



TUGAS AKHIR - TF 141581

**DESAIN *PLANTWIDE CONTROL* PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR TIPE
*HIGH TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR***

**ARIEL FAISHAL LINGGA PUTRA
NRP. 02311 440000 036**

**Dosen Pembimbing:
Totok Ruki Biyanto, Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 141581

***PLANTWIDE CONTROL DESIGN FOR HIGH
TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR
NUCLEAR POWER PLANT***

***ARIEL FAISHAL LINGGA PUTRA
NRP. 0231 14400 00036***

***Supervisor:
Totok Ruki Biyanto, Ph.D.***

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018***

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Ariel Faishal Lingga Putra
NRP : 023114410000036
Departemen/Prodi : Teknik Fisika/S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “*Desain Plantwide Control Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Tipe High Temperature Gas-Cooled Reactor*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 4 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Ariel Faishal Lingga Putra
NRP. 02311440000036

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**DESAIN *PLANTWIDE CONTROL* PADA PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA NUKLIR TIPE *HIGH TEMPERATURE*
*GAS-COOLED REACTOR***

Oleh:

Ariel Faishal Lingga Putra
NRP. 02311440000036

Surabaya, 25 Juli 2018

Menyetujui

Dosen Pembimbing



Totok Ruki Biyanto, Ph.D.
NIP. 19710702 199802 1 001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

vii

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN *PLANTWIDE CONTROL* PADA PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA NUKLIR TIPE *HIGH TEMPERATURE*
*GAS-COOLED REACTOR***



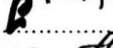

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ARIEL FAISHAL LINGGA PUTRA
NRP. 02311440000036

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Totok Ruki Biyanto, Ph.D.  (Pembimbing I)
2. Ir. Matradji, M.Sc.  (Ketua Penguji)
3. Hendra Cordova, S.T., M.T.  (Penguji 1)
4. Dr.rer.nat. Aulia M.T. Nasution, M.Sc.  (Penguji 2)

SURABAYA

Juli, 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN *PLANTWIDE CONTROL* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR TIPE *HIGH TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR*

Nama : Ariel Faishal Lingga Putra
NRP : 02311440000036
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Totok Ruki Biyanto, Ph.D.

Abstrak

Efek emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh manusia telah menyebabkan semakin tingginya efek pemanasan global. Sektor energi memiliki peran yang sangat besar dalam hal ini, terutama sektor energi yang menggunakan bahan bakar hidrokarbon. Salah satu sumber energi yang ramah lingkungan yaitu melalui tenaga nuklir. *Plant* yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu PLTN tipe *High Temperature Gas-Cooled Reactor* yang memanfaatkan energi yang dihasilkan oleh reaksi fisi *Uranium* untuk memanaskan gas *Helium*, gas *Helium* ini yang digunakan untuk memanaskan air menjadi uap bertekanan tinggi untuk memutar turbin. Tingginya resiko dari PLTN ini, adanya material serta energi *recycle* dan pertimbangan ekonomis untuk profit dari *plant* ini membutuhkan perancangan *Economic PlantWide Control*. Variabel yang sangat mempengaruhi sisi ekonomis *plant* yang perlu dikendalikan yaitu pada energi yang dibutuhkan pada reaktor yang dihasilkan melalui reaksi fisi *Uranium* dan laju aliran air umpan. Variabel yang berperan sebagai *TroughPut Manipulator* (TPM) yaitu *set point* daya. Dalam analisa PWC ini akan dibandingkan tiga mode kontrol yaitu *Boiler Following Mode* (BFM), *Turbine Following Mode* (TFM), dan *Coordinate Control Mode* (CCM). Hasil dari analisa PWC ini mode kontrol yang menghasilkan profit terbesar yaitu metode kontrol CCM dengan profit sebesar Rp 2.333.298,00 tiap jamnya, sedangkan strategi kontrol yang memiliki efisiensi energi terbesar yaitu strategi kontrol BFM dengan efisiensi 29,6 %

Kata Kunci: *PlantWide control, Nuclear Power Plant, Control Mode, High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)*

***PLANTWIDE CONTROL DESIGN FOR HIGH
TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR NUCLEAR
POWER PLANT***

Name : Ariel Faishal Lingga Putra
NRP : 02311440000036
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisors : Totok Ruki Biyanto, Ph.D.

Abstract

. The greenhouse effect produced by human has caused the increasing of global warming. Energy sector takes the biggest role, especially the energy sector that are using hydrocarbon fuel. One of the alternative in more environmentally friendly energy is nuclear energy. Plant that will be used in this final project is the High Temperature Gas-Cooled Reactor Nuclear Power Plant. This plant utilizes the energy produced from fission reaction to heat the Helium gas, the Helium gas then transfers its energy within the steam generator to the feed water and turns it into high energy steam that is used to rotate turbine to produce electricity. The Economic PlantWide Control is needed in designing the control strategy for this plant, because of a such high risk of this plant, the existence of energy and material balance, and economical consideration to maximize the profit of this plant. The economical variables that are needed to be controlled is the thermal energy delivered to the reactor from the uranium fission inside the reactor and the mass flow rate of the feed water. The variable that acts as the ThroughPut Manipulator (TPM) of this plant is the set point value of the Power. There are three control strategies that will be analyzed which are Boiler Following Mode (BFM), Turbine Following Mode (TFM), and Coordinate Control Mode (CCM). The best control mode which produced the most profit is the CCM, this control mode is able to produce profit of 2.333.298,00 IDR for each hour, while the BFM has the highest energy efficiency of 29,6 %.

Keywords: Plantwide control, Nuclear Power Plant, Control Mode, High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **DESAIN PLANTWIDE CONTROL PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR TIPE HIGH TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua serta keluarga terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
2. Bapak Totok Ruki Biyanto S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing dan Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta inspirasi.
3. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
4. Bapak Ir. Jerry Susatio, M.T. selaku dosen wali penulis yang telah membimbing selama perkuliahan.
5. Seluruh teman Tugas Akhir terima kasih untuk semuanya.
6. Seluruh Asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol atas segala bantuannya.
7. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika FTI-ITS, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. Rekan-rekan bidang minat instrumentasi bantuan dan perjuangannya.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan

kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Selain itu juga semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 20 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Lingkup Kerja.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Energi Nuklir	5
2.2 Reaksi Fisi	6
2.2.1 <i>Uranium</i>	7
2.2.2 <i>Uranium Enrichment</i>	9
2.2.3 <i>Cross Section</i>	9
2.2.4 Moderator	9
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).....	10
2.4 <i>High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)</i>	11
2.4.1 Reaktor HTGR	12
2.4.2 <i>Coolant</i> Reaktor	14

2.4.3 <i>Steam Generator</i> (Pembangkit Uap)	16
2.4.4 <i>Process Flow Diagram</i> pada PLTN HTGR	19
2.5 Strategi Kontrol <i>Power Plant</i>	21
2.5.1 <i>Boiler Following Mode</i> (BFM)	21
2.5.2 <i>Turbine Following Mode</i> (TFM).....	22
2.5.3 <i>Coordinated Control Mode</i> (CCM)	23
2.5 <i>Economic PlantWide Control</i>	24
2.6 <i>First Order Plus Dead Time</i> (FOPDT)	26
2.7 Analisa Performansi Kontrol	28
BAB III METODOLOGI	31
3.1 Pengumpulan Data Komponen dan Konfigurasi <i>Plant</i> PLTN	32
3.3.1 Bagian <i>Top-Down</i> metode Skogestad	34
3.3.2 Bagian <i>Bottom Up</i> metode Skogestad.....	37
3.4 Pengujian Performansi Sistem dan Analisis	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Analisa Hasil Simulasi.....	43
4.1.1 Uji <i>Set Point</i> Strategi Kontrol <i>Boiler Following</i> <i>Mode</i> (BFM)	43
4.1.2 Uji <i>Set Point</i> Strategi Kontrol <i>Turbine Following</i> <i>Mode</i> (TFM)	49
4.1.3 Uji <i>Set Point</i> Strategi Kontrol <i>Coordinated</i> <i>Control Mode</i> (CCM).....	54
4.1.4 Uji <i>Disturbance</i>	59
4.1.5 Perhitungan Operasional RDE	61
4.2 Pembahasan	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1 Kesimpulan	67

5.2 Saran	67
BIODATA PENULIS	71

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Reaksi fisi	6
Gambar 2. 2 <i>Uncontrolled chain reaction</i>	8
Gambar 2. 3 <i>Controlled chain reaction</i>	8
Gambar 2. 4 Diagram alir energi pada PLTN	11
Gambar 2. 5 Reaktor HTGR.....	12
Gambar 2. 6 <i>Tri-Isotropic (TRISO)-coated fuel particles</i>	13
Gambar 2. 7 Grafik temperatur fluida pada <i>heat exchanger</i>	16
Gambar 2. 8 Keseimbangan energi fluida panas dan dingin pada <i>heat exchanger</i>	17
Gambar 2. 9 Bentuk dasar <i>shell-and-tube heat exchanger</i>	18
Gambar 2. 10 <i>Steam Generator</i> pada <i>plant</i> nuklir	19
Gambar 2. 11 <i>Process Flow Diagram</i> RDE HTGR	19
Gambar 2. 12 Strategi kontrol <i>Boiler Following Mode</i>	22
Gambar 2. 13 Strategi kontrol <i>Turbine Following Mode</i>	23
Gambar 2. 14 Strategi kontrol <i>Coordinated Control Mode</i>	24
Gambar 2. 15 Grafik <i>FOPDT</i>	27
Gambar 2. 16 Analisa karakteristik performansi kontrol	28
Gambar 2. 17 Interpretasi IAE uji <i>disturbance</i> dan uji <i>set point</i>	29
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	31
Gambar 3. 2 <i>Process Flow Diagram HTGR NPP</i>	32
Gambar 3. 3 Variabel-variabel utama pada fungsi objektif	35
Gambar 3. 4 Struktur kontrol BFM.....	38
Gambar 3. 5 Struktur kontrol TFM.....	39
Gambar 3. 6 Struktur kontrol CCM	40
Gambar 4. 1 Pemodelan strategi kontrol <i>Boiler Following Mode</i> pada HYSYS	44
Gambar 4. 2 <i>Loop</i> kontrol temperatur pada BFM	45
Gambar 4. 3 Grafik respon kontrol temperatur pada BFM	46
Gambar 4. 4 <i>Loop</i> kontrol daya pada BFM.....	47
Gambar 4. 5 Grafik respon kontrol daya BFM.....	48
Gambar 4. 6 Pemodelan strategi kontrol <i>Turbine Following Mode</i> pada HYSYS	50
Gambar 4. 7 <i>Loop</i> kontrol EIC-100 TFM	51

Gambar 4. 8 Grafik respon kontrol daya TFM52

Gambar 4. 9 *Loop* kontrol temperatur TFM53

Gambar 4. 10 Grafik respon kontrol temperatur TFM54

Gambar 4. 11 Pemodelan stratagi kontrol *Coordinated Control Mode* pada HYSYS55

Gambar 4. 12 *Loop* kontrol temperatur pada CCM.....56

Gambar 4. 13 Grafik respon kontrol temperatur pada CCM57

Gambar 4. 14 Grafik respon kontrol daya CCM58

Gambar 4. 15 Grafik uji *disturbance* terhadap *set point* daya60

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data <i>Properties</i> RDE HTGR.....	33
Tabel 3. 2 Nilai CDOF pada RDE HTGR.....	36
Tabel 3. 3 <i>Gain</i> dan <i>Time Constant</i> MPC	41
Tabel 4. 1 Parameter kontrol temperatur pada BFM.....	45
Tabel 4. 2 Karakteristik respon kontrol temperatur BFM	46
Tabel 4. 3 Parameter kontrol daya BFM	47
Tabel 4. 4 Karakteristik respon kontrol daya BFM.....	48
Tabel 4. 5 Parameter kontrol daya TFM	51
Tabel 4. 6 Parameter kontrol temperatur TFM.....	53
Tabel 4. 7 Karakteristik respon kontrol temperatur pada TFM...	54
Tabel 4. 8 Parameter kontrol temperatur CCM	56
Tabel 4. 9 Karakteristik respon kontrol temperatur pada CCM ..	57
Tabel 4. 10 Parameter kontrol <i>cascade</i> daya CCM	58
Tabel 4. 11 Karakteristik respon kontrol daya CCM	59
Tabel 4. 12 Parameter uji <i>disturbance</i>	60
Tabel 4. 13 Perhitungan daya bersih RDE	62
Tabel 4. 14 Perhitungan efisiensi energi	63

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, efek emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh manusia harus dikurangi untuk mencegah pemanasan global lebih jauh. Sektor energi mempunyai peran penting dalam mengurangi emisi ini, terutama emisi karbon dioksida. Bahan bakar fosil masih mendominasi sektor energi secara global dan akan tetap demikian pada beberapa masa yang akan datang [1]. Dalam 50 tahun ke depan, produksi dan penggunaan energi akan menyebabkan pemanasan global melalui emisi gas rumah kaca dalam skala yang besar berupa ratusan miliar ton karbon dalam bentuk karbon dioksida [2]. Pada tahun 2002 saja, aktivitas manusia menghasilkan 6,5 miliar ton emisi karbon per tahun. Tingkat emisi karbon dapat meningkat menjadi lebih dari dua kali lipat pada tahun 2050, sehingga tenaga nuklir dapat menjadi salah satu opsi untuk mengurangi emisi karbon [2].

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) telah terbukti mampu menghasilkan tenaga yang bersih dan diandalkan dalam jumlah yang besar. Selain itu juga nuklir dipercaya sebagai sumber energi bebas emisi CO₂ yang paling menjanjikan dengan cadangan bahan bakar yang tersedia dalam jangka panjang. [3]. Pada tahun 2009, Sekitar 14% dari listrik yang diproduksi di seluruh dunia berasal dari 438 PLTN, sementara 68% berasal dari pembangkit berbahan bakar fosil [4]. Konsep dasar dari sebuah PLTN adalah untuk menghasilkan listrik dengan sumber energi proses nuklir [5]. Terdapat banyak tipe PLTN yang telah dikembangkan, salah satu tipe PLTN yaitu tipe *High Temperature Gas-Cooled Reactor* (HTGR) yang menggunakan gas *Helium* sebagai *coolant* dari reaktor yang mentransfer panas dari reaksi fisi uranium menuju *steam generator* yang kemudian memanaskan air umpan menjadi uap untuk memutar turbin. Selain memiliki kadar emisi karbon yang rendah, energi yang dihasilkan oleh PLTN sangat besar. Jika dibandingkan dengan batu bara, satu kilogram

bahan bakar uranium setara dengan energi yang dihasilkan dengan membakar 3.000 ton batu bara [6].

Seperti halnya pembangkit listrik dari tenaga fosil, yang mempergunakan uap sebagai agen pembawa energi ke turbin, maka kontrol yang mampu mengatasi sistem pada tekanan dan temperatur tinggi diperlukan. Ditambah lagi, PLTN dalam pengoperasiannya memiliki resiko yang tinggi akibat bahaya dari radiasi. Oleh karena itu pengoperasian *plant* yang optimal sangatlah penting untuk meminimalisir kesalahan dapat terjadi dan memaksimalkan daya yang dihasilkan. Penerapan *PlantWide Control* (PWC) pada *plant* PLTN untuk mengendalikan *plant* agar berjalan sesuai parameter-parameternya diperlukan.

PWC adalah sistem dan strategi yang dibutuhkan untuk mengendalikan keseluruhan *plant* yang terdiri dari banyak unit operasi yang saling terhubung satu sama lain [8]. Pada tugas akhir ini, akan diteliti metode PWC milik Skogestad pada PLTN dengan mempertimbangkan sisi ekonomi sehingga disebut *Economic PlantWide Control* (EPWC). Untuk mendapatkan daya yang optimum dsengan memanipulasi laju aliran air, konsumsi air juga akan dipertimbangkan untuk mendapatkan penggunaan air yang optimal. Hal lain yang perlu diperhatikan dalam penggunaan energi adalah pada pemakaian energi *steam* yang sangat tinggi, sehingga pemakaian energi *steam* secara ekonomis juga diperhatikan pada tugas akhir ini.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian yang diangkat dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang EPWC yang diterapkan pada PLTN?
2. Bagaimana dampak penerapan EPWC pada PLTN terhadap kestabilan *plant*, efisiensi energi, serta sisi ekonomi yang lain?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang EPWC yang diterapkan pada PLTN.
2. Menganalisis dampak penerapan EPWC pada PLTN terhadap kestabilan *plant*, efisiensi energi, serta sisi ekonomi yang lain.

1.4 Lingkup Kerja

Adapun lingkup pekerjaan pada penelitian dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah menggunakan *plant* PLTN HTGR dengan kapasitas daya elektrik 3 MW. Simulasi yang digunakan menggunakan aplikasi Aspen HYSYS 8.8. Untuk metode PWC yang digunakan menggunakan metode *Economic PlantWide Control* Skogestad. Hasil dari analisa *Economic PlantWide Control* ini digunakan untuk menentukan struktur kontrol pada PLTN. Struktur kontrol dirancang untuk memaksimalkan energi dan air yang digunakan untuk menghasilkan keuntungan optimal. Bagian PLTN yang dimodelkan terdiri dari reaktor dimodelkan dengan tipe *heater*, *steam generator*, turbin, dan kondensor.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan hal hal mengenai teori-teori pendukung yang menjadi landasan berpikir dalam penulisan tugas akhir. Teori teori tersebut didapatkan dari jurnal dan buku.

2.1 Energi Nuklir

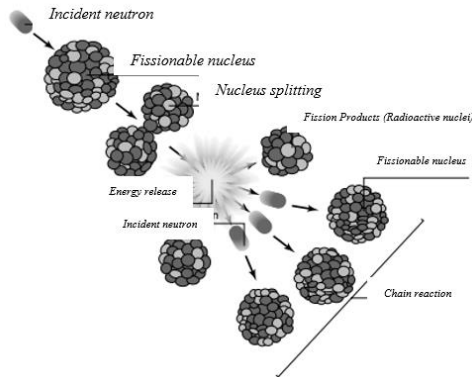
Dalam keadaan normal, sebuah inti atom bersifat stabil dan akan tetap pada kondisi awalnya. Contohnya pada inti atom besi (Fe), atom Fe tidak akan berubah menjadi elemen lainnya seperti menjadi Emas (Au). Namun terdapat beberapa elemen yang tidak stabil dan dapat berubah menjadi bentuk yang lain secara spontan dengan melepaskan emisi berupa radiasi. Radiasi yang dilepaskan memiliki energi kinetik dan proses disintegrasi inti atom menghasilkan pelepasan energi yang mengikat inti atom yang dinamakan energi nuklir. Jika massa inti atom dapat ditimbang dan dibandingkan dengan inti setelah proses disintegrasi maka akan terdapat perubahan kecil pada massa inti atom akibat dari konversi dari massa inti atom menjadi energi. Hubungan antara massa yang hilang m dengan energi yang hilang E dapat ditunjukkan melalui persamaan yang sangat terkenal yang dirumuskan oleh Albert Einstein [6] . Dimana nilai dari c merupakan kecepatan cahaya yaitu 300.000 kilometer per sekon

$$E = m c^2. \quad (2.1)$$

Energi yang dihasilkan dari kehilangan massa sangat besar. Jika dibandingkan dengan batubara maka setiap kilogram massa dari sebuah inti atom yang hilang menjadi energi ekuivalen dengan membakar 3 juta ton batu bara jika diukur menggunakan satuan energi yaitu 9×10^{31} Joule. Namun pada reaksi nuklir pada umumnya hanya sebagian kecil saja dari massa yang dikonversi menjadi energi sekitar kurang lebih 0,1% sehingga satu kilogram uranium kurang lebih sama dengan membakar 3.000 ton batubara.

[7] Disintegrasi dari inti yang tidak stabil dan pelepasan energi nuklir dapat distimulasi dengan memberi radiasi .

2.2 Reaksi Fisi



Gambar 2. 1 Reaksi fisi [6]

Reaksi fisi merupakan reaksi pemisahan nukleus (inti atom) menjadi dua bagian atau fragmen fisi, elektron bebas, energi yang dilepaskan dalam bentuk panas (energi kinetik fragmen), dan radiasi [7]. Inti dari sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) terdapat pada reaksi fisi. Dari reaksi fisi ini energi yang sangat besar dihasilkan untuk nantinya diubah menjadi energi listrik. Reaksi fisi dapat berlangsung secara spontan ataupun diinduksi. Jika sebuah nukleus mengalami reaksi fisi tanpa pengaruh eksternal maka disebut reaksi fisi spontan. Namun kebanyakan reaksi fisi adalah reaksi fisi terinduksi. Pada reaktor nuklir, neutron merupakan sumber dari reaksi fisi terinduksi [7].

Proton merupakan partikel yang bermuatan sehingga dipengaruhi oleh gaya Coulumb. Sedangkan pada inti atom terdapat gaya nuklir yang mengikat inti satu sama lain dengan sangat kuat. Gaya nuklir pada nukleus ini sangat kuat namun hanya

berefek pada jarak yang sangat pendek, sekitar 1 fm. Sehingga dengan memberikan energi yang cukup maka nukleus dapat dipisahkan [4]. Energi yang diberikan kepada inti ini akan membuat inti atom mengalami deformasi (rotasi atau vibrasi). Jika energinya cukup dan melewati batas yang dinamakan *saddle point* maka inti atom akan mengalami reaksi fisi yang menyebabkan inti atom terpisah menjadi dua bagian [7].

2.2.1 *Uranium*

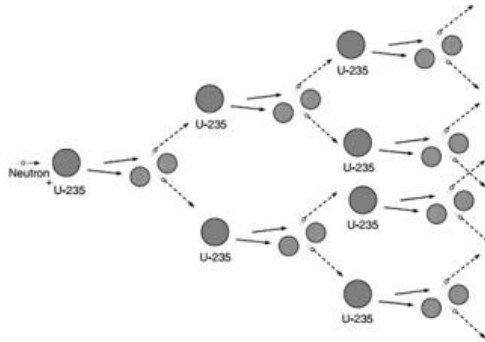
Uranium (U) merupakan bahan bakar utama dari proses reaksi fisi pada reaktor nuklir saat ini. *Uranium* memiliki 92 proton dan 25 isotop dari ^{217}U hingga ^{242}U [11]. 99,3 % dari *Uranium* yang tersedia di alam merupakan *Uranium*-238 (U-238, 238 merupakan penjumlahan neutron dan proton) dan U-235 sebesar 0,71%, dua uranium U-238 dan U-235 ini merupakan yang paling stabil. U-235 meluruh lebih cepat dari U-238. U-235 dapat distimulasi untuk mengalami reaksi fisi dengan menembakkan neutron pada intinya. Ketika satu neutron memasuki inti U-235, menyebabkan U-235 berubah menjadi U-236 maka akan mengalami reaksi fisi akibat ketidakstabilan yang ditimbulkan oleh penambahan satu neutron tadi [8].

Reaksi fisi dari U-235 menyebabkan terpisah menjadi *Barium*, *Krypton*, dan tiga neutron.



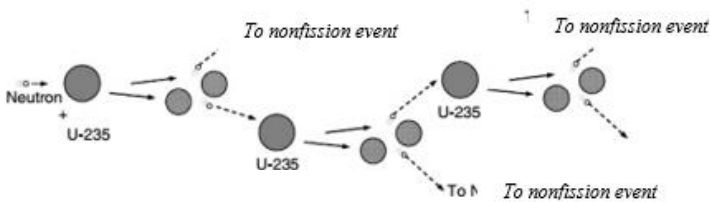
Jika massa dari pada sisi kanan dibandingkan dengan sisi kiri maka sisi kanan memiliki massa 0,091% lebih kecil dibanding sisi kiri. Sekitar 0,1% massa ini dikonversi menjadi energi, energi ini berupa energi kinetik dari produk reaksi fisi dan neutron yang kemudian bertabrakan dengan atom sekitarnya dan meningkatkan vibrasi termalnya yang kemudian melepaskan panas. Setiap kilogram U-235 yang seluruhnya mengalami reaksi fisi sesuai

reaksi di atas melepaskan energi sebesar 8×10^{13} Joule. Energi ini setara dengan membakar 3000 ton batu bara [6].



Gambar 2. 2 *Uncontrolled chain reaction* [8]

Salah satu kegunaan reaksi fisi adalah bom nuklir, bom nuklir dibuat berdasarkan reaksi berantai yang tidak dikontrol. Reaksi berantai neutron terjadi ketika, contohnya dua neutron hasil reaksi fisi U-235 menghasilkan dua reaksi fisi yang lain. Hal ini akan terjadi apabila U-235 yang murni berada pada kondisi *critical mass* sekitar 60 kilogram metal. Seperti yang digambarkan diatas reaksi fisi awal hingga reaksi yang tak terhitung jumlahnya terjadi dalam hitungan mikrodetik. Energi yang sangat besar ini dilepaskan dalam hitungan mikrodetik menghasilkan tenaga ledakan yang sangat besar [8].



Gambar 2. 3 *Controlled chain reaction* [8]

Namun dalam pembangkit nuklir menggunakan prinsip *controlled chain reaction*. Reaksi fisi berantai neutron ini diatur sehingga mengasikan laju reaksi fisi berjalan konstan dan energi yang dihasilkan pun juga bersifat konstan [8].

2.2.2 *Uranium Enrichment*

Untuk mempertahankan produksi energi yang *steady* dari reaksi fisi, maka satu neutron dari setiap reaksi fisi yang dihasilkan diharapkan dapat menginduksi satu reaksi fisi lainnya. Umumnya, neutron yang dihasilkan berjumlah lebih dari satu, namun neutron dapat hilang dari reaksi lewat berbagai macam cara (contohnya oleh absorpsi reaksi non fisi, oleh U-238). Secara natural, uranium yang tersedia terdiri dari hanya 0.7% U-235 dan 99.3% U-238, yang berarti mayoritas *Uranium* yang tersedia tidak mengalami reaksi fisi, namun menghilangkan neutron untuk dapat menghasilkan reaksi fisi lainnya. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan apa yang dinamakan *enriched Uranium*, yaitu komposisi dari U-235 ditingkatkan dari 0.7% hingga 3-5% (Mayoritas reaktor) [9].

2.2.3 *Cross Section*

Cross Section merupakan probabilitas terjadinya reaksi dari sebuah atom dengan luasan nukleus yang dituju oleh sebuah proyektil dari sebuah reaksi. Semakin besar probabilitas reaksi maka semakin besar pula *cross section*. Umumnya *cross reaction* bergantung pada energi dari partikel yang datang, K_x . *Cross Section* σ dinyatakan dalam bentuk luasan area, namun dalam ukuran yang sangat kecil yaitu $10^{-28} \text{ m}^2 = 1 \text{ barn}$. [9].

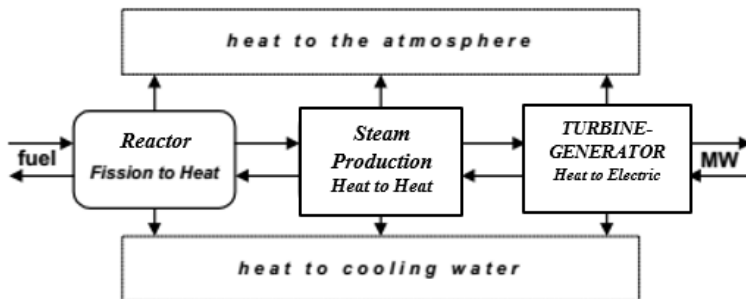
2.2.4 *Moderator*

Neutron-neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi memiliki energi kinetik yang besar hingga beberapa MeV. Neutron berenergi tinggi ini mempunyai probabilitas yang kecil untuk menginduksi reaksi fisi yang baru, karena *cross section* dari reaksi fisi ini akan

berkurang dengan meningkatnya energi neutron. Sehingga neutron ini harus diperlambat sehingga probabilitas untuk menginisiasi reaksi fisi yang lain dapat meningkat. Untuk memperlambat neutron ini dibutuhkan moderator yang mengelilingi *fissionable material* atau bahan bakar dari reaksi fisi yaitu Uranium. Ketika neutron terpisah dari inti atom berat yaitu dalam kasus ini Uranium, maka energi neutron hampir tidak berubah, namun ketika bertabrakan dengan inti atom yang sangat ringan, maka neutron akan kehilangan energi yang besar. Moderator yang paling efektif adalah moderator yang memiliki massa atom yang hampir sama dengan massa neutron, sehingga hidrogen menjadi pilihan pertama. Air biasa sering digunakan sebagai moderator, karena tabrakan dengan proton sangat efektif dalam memperlambat neutron [9]. moderator harus memiliki massa sedekat mungkin dengan neutron, harga terjangkau, persediaan dapat dijamin, densitas yang tinggi dan stabil secara kimiawi [10].

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

Konsep dasar dari PLTN adalah untuk menghasilkan listrik dari panas yang dihasilkan dari proses nuklir pada reaktor. Sistem reaktor menghasilkan panas yang menggantikan peran *furnace* pada sistem pembangkit berbahan bakar fosil [11]. Bahan bakar yang mengandung Uranium mengalami reaksi fisi pada reaktor. Energi yang dihasilkan berupa panas yang kemudian digunakan untuk memanaskan gas *Helium*. Uap yang dihasilkan dari *steam generator* diumpan menuju turbin yang akan memutar generator listrik. Panas tadi kemudian dikonversi menjadi energi kinetik pada turbin dan menjadi listrik pada generator. Listrik yang dihasilkan di generator disuplai ke sistem tenaga listrik untuk disalurkan ke pengguna [12].



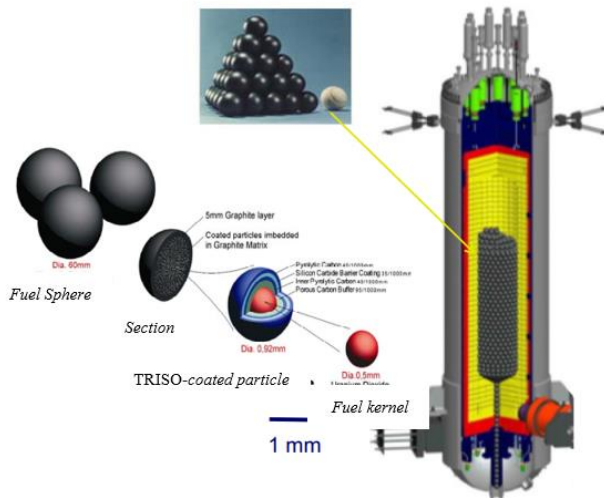
Gambar 2. 4 Diagram alir energi pada PLTN [8]

Terdapat berbagai macam tipe reaktor berdasarkan kombinasi dari bahan bakar yang digunakan dan moderator, antara lain reaktor dengan menggunakan moderator grafit, dan Reaktor dengan menggunakan moderator air. Mayoritas PLTN di dunia menggunakan reaktor yang menggunakan moderator dan *coolant* berupa air, namun pada tugas akhir ini akan lebih dibahas tentang Reaktor yang menggunakan moderator grafit terutama tipe *High Temperature Gas-cooled Reactor*.

2.4 *High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)*

High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) adalah tipe PLTN yang menggunakan gas *Helium* sebagai *coolant* primer dan menggunakan moderator Grafit. Penggunaan *Helium* sebagai gas *coolant* adalah karena *Helium* bersifat inert dan dapat mencapai suhu *coolant* yang lebih tinggi dibanding gas lain contohnya karbon dioksida [6]. Dengan meningkatnya suhu operasi reaktor yang dapat mencapai 950 °C ini maka dapat meningkatkan efisiensi siklus uap sehingga memungkinkan untuk penggunaan gas turbin yang langsung dipanaskan oleh *coolant* [13].

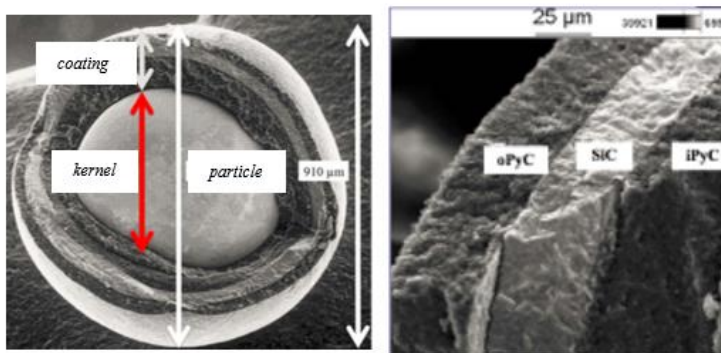
2.4.1 Reaktor HTGR



Gambar 2. 5 Reaktor HTGR [13]

Bahan bakar HTGR tidak terdiri dari batang bahan bakar seperti tipe *Light Water Reactor* (LWR), namun berupa partikel-partikel bahan bakar. Bahan bakar ini berbentuk bola-bola kecil. Setiap bola ini mengandung inti yang berisi *Uranium* Oksida (UO₂) dengan *Uranium* yang diperkaya hingga 9 % ²³⁵U, dibungkus dengan lapisan karbon dan silikon karbit yang dapat menjaga bahan bakar stabil hingga 2.000 °C [13]. Tipe bahan bakar ini dinamakan *Tri-Isotropic* (TRISO)-coated fuel particles dengan diameter sekitar 1 mm. Bahan bakar TRISO terdiri dari inti mikro yang berbentuk bulat berisi bahan bakar oksida atau *oxycarbide* dan dilapisi oleh lapisan *pyrolytic carbon* berpori (*buffer*), lapisan padat bagian dalam berupa *pyrolytic carbon* (IPyC), *silicon carbide* (SiC) dan lapisan padat luar *pyrolytic carbon* (OPyC). Fungsi dari lapisan pelindung ini adalah untuk menahan produk fisi tetap di dalam partikel. Selain itu, lapisan pelindung SiC berfungsi

sebagai pembatas terhadap pelepasan produk fisi metalik secara difusif dan menyediakan kekuatan mekanik untuk partikel [14].



Gambar 2. 6 *Tri-Isotropic (TRISO)-coated fuel particles* [14]

- **Sistem Batang Kendali (*Control Rods System*)**

Di dalam inti reaktor, perlu adanya sistem yang mengendalikan reaksi fisi agar panas yang dihasilkan dapat diatur. Sistem ini disebut sistem batang kendali (*Control Rods System*). Mengendalikan reaksi dilakukan dengan membatasi jumlah reaksi yang terjadi, yaitu dengan mengendalikan neutron fluks yang ada didalam reaktor. Untuk mengendalikan neutron fluks, dibutuhkan material yang mampu menangkap neutron. *Cadmium*, *Boron*, *Indium* dan *Silver* adalah yang umum digunakan pada reaktor nuklir karena memiliki nilai *neutron capture cross section* yang besar [10]. Mekanisme dari *control rods* adalah dengan membuat material penangkap neutron yang dapat digerakkan masuk dan keluar vessel reaktor, sehingga jumlah material penyerap neutron dapat dikendalikan jumlahnya. Kedalaman dari *control rods* berbanding terbalik dengan jumlah reaksi karena semakin dalam *control rods* dimasukkan ke dalam *fuel rods* maka semakin banyak neutron yang tertangkap sehingga reaksi yang terjadi akan berkurang, demikian juga dengan panas yang dihasilkan akan berkurang.

2.4.2 Coolant Reaktor

Coolant reaktor merupakan fluida yang berfungsi untuk membawa energi yang dihasilkan dari reaksi fisi di dalam reaktor. Terdapat berbagai macam *coolant* untuk pembangkit nuklir baik itu fluida cair maupun gas. Faktor-faktor yang berpengaruh dalam pemilihan *coolant* reaktor adalah sebagai berikut:

- Kalor jenis tinggi (C_p)

Kalor jenis (C_p) merupakan jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 kilogram zat sebesar 1 K (1°C) dan memiliki besaran joule per kilogram per kelvin ($\text{J}/\text{kg K}$). Semakin tinggi nilai C_p sebuah fluida maka akan semakin efektif perpindahan panas yang terjadi di dalam reaktor.

- Laju transfer panas yang tinggi

Laju panas yang dapat ditransfer dari elemen bahan bakar ke *coolant* ditentukan salah satunya konduktifitas termal dari fluida, yaitu perbandingan dari laju transfer panas dari volume statis fluida dan gradien temperatur. Contohnya besar perubahan temperatur tiap satuan panjang.

- Sifat nuklir yang baik

Coolant reaktor harus memiliki nilai penyerapan neutron yang rendah karena penyerapan neutron oleh *coolant* dapat mengurangi jumlah neutron yang tersedia untuk reaksi fisi. *Coolant* harus tidak bereaksi dengan neutron karena dapat menyebabkan atom *coolant* berubah menjadi isotop radioaktif yang berbahaya.

- Keadaan fase yang stabil

Coolant reaktor harus tetap pada satu fasa baik saat kondisi normal maupun saat terjadi masalah.

- Harga dan ketersediaan

Persediaan *coolant* dari sebuah reaktor berjumlah besar hingga dapat mencapai ratusan ton. Sangat penting untuk meminimalisir *cost* dari *coolant* reaktor ini.

- Kompatibilitas

Coolant reaktor harus cocok dengan material yang digunakan pada *loop* reaktor dan tidak menyebabkan korosi pada material reaktor, meskipun dalam kondisi fluks radiasi yang tinggi yang terjadi pada inti reaktor.

- Mudah di Pompa

Fluida dengan viskositas yang rendah membutuhkan lebih sedikit energi dibandingkan fluida dengan viskositas yang besar.

Namun tidak ada *coolant* yang ideal yang dapat memenuhi semua kriteria di atas. Masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangannya. Termodinamika dan karakteristik transfer panas dari *coolant* dapat dibandingkan dengan parameter yang disebut *figure of merit*, parameter ini diturunkan dari proses perpindahan panas dan tenaga pompa yang dibutuhkan dengan persamaan berikut:

$$F = \frac{Cp^{2.8} \rho^2}{\mu^{0.2}} \quad (2.1)$$

Dimana:

Cp : Kalor jenis
 ρ : Massa jenis
 μ : Viskositas

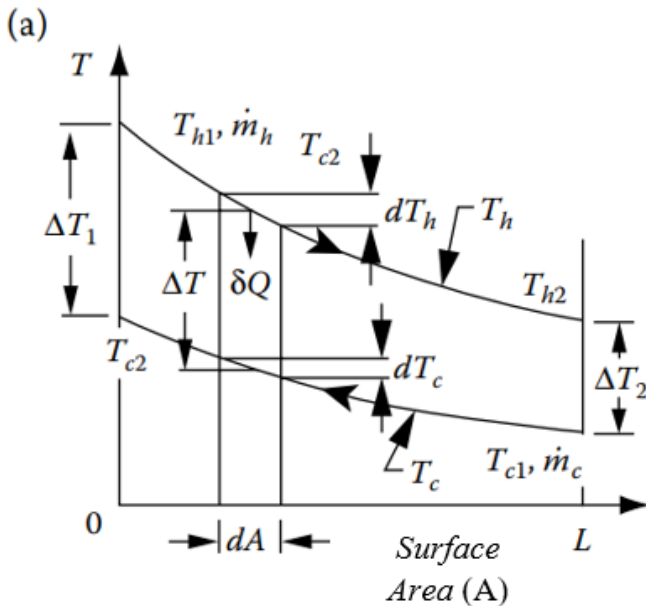
Coolant yang memiliki fase gas memiliki keuntungan besar, yaitu fase yang stabil. Pada *coolant* yang bersifat cair dapat menyebabkan perubahan fasa saat terjadi kondisi abnormal. Kelemahan dari *coolant* gas adalah memiliki koefisien transfer panas yang rendah.

Reaktor HTGR ini menggunakan gas *coolant* yaitu gas *Helium*. Gas *Helium* termasuk gas yang bersifat inert yaitu tidak membentuk senyawa dengan elemen lainnya. *Helium* memiliki berat molekul 4 terdapat dalam jumlah yang sedikit di atmosfer namun pada umumnya didapatkan dari sumur minyak dan gas alam. *Helium* dipilih dibandingkan gas inert lainnya karena dapat

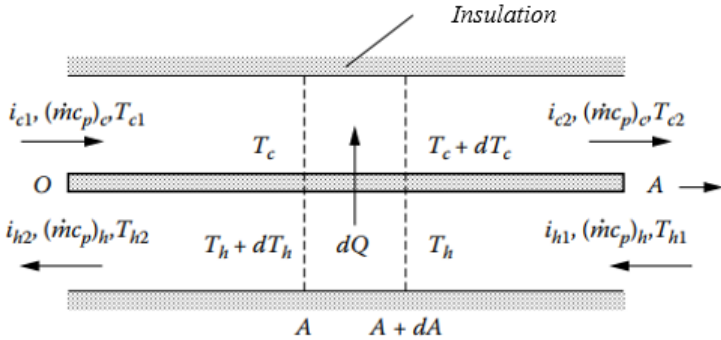
bersifat stabil terhadap adanya fluks neutron. *Helium* juga dapat beroperasi hingga mencapai suhu 800 °C tanpa menyebabkan pengaruh kimiawi terhadap moderator [6].

2.4.3 Steam Generator (Pembangkit Uap)

Pada *plant* nuklir sistem penukar panas antara *coolant* reaktor dan air umpan menggunakan istilah *steam generator* atau pembangkit uap, atau pada istilah umumnya adalah *heat exchanger*. *Heat exchanger* adalah sebuah alat untuk mentransfer energi termal dari dua atau lebih fluida dengan suhu yang berbeda [15].



Gambar 2.7 Grafik temperatur fluida pada *heat exchanger* [15]



Gambar 2. 8 Keseimbangan energi fluida panas dan dingin pada *heat exchanger* [15]

Dari hukum pertama termodinamika untuk sistem terbuka, kondisi *steady state*, laju alir yang stabil, dengan mengesampingkan perubahan energi potensial dan energi kinetik, perubahan kalor dari sebuah fluida sebanding dengan perubahan entalpinya sesuai persamaan berikut

$$Q = \dot{m} (i_2 - i_1) \quad (2.2)$$

Nilai i_2 dan i_1 merupakan nilai entalpi *inlet* dan *outlet* dari sebuah aliran fluida. Berdasarkan grafik pada gambar 2.7 dan gambar 2.8 keseimbangan energi, persamaan perubahan kalor sesuai persamaan berikut

$$Q = (\dot{m}c_p)_h (T_{h1} - T_{h2}) \quad (2.3)$$

Dan

$$Q = (\dot{m}c_p)_c (T_{c2} - T_{c1}) \quad (2.4)$$

Keterangan h merupakan untuk fluida panas dan c untuk fluida dingin, sedangkan keterangan 1 dan 2 untuk kondisi inlet dan outlet fluida. Dari gambar 2.7 didapatkan perbedaan suhu antara

fluida panas dan dingin ($\Delta T = T_h - T_c$) bervariasi berdasarkan posisi dari *heat exchanger*. Sehingga dalam analisa transfer panas pada *heat exchanger*, dibutuhkan nilai rata-rata perbedaan temperatur yang cocok antara fluida panas dan dingin sehingga laju total perpindahan panas antar fluida dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut

$$Q = UA \Delta T_{LMTD} \quad (2.5)$$

Dimana:

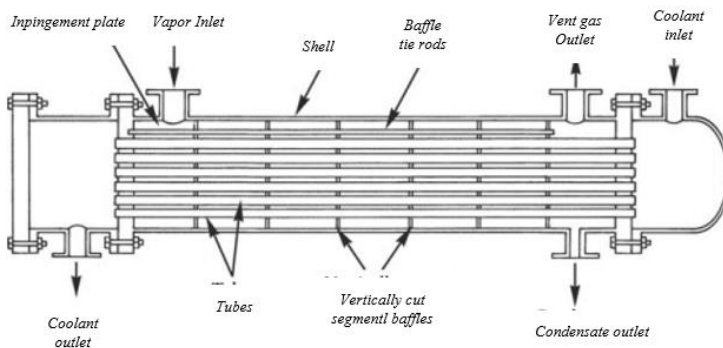
Q : Laju perpindahan panas pada *shell* dan *tube* (W)

U : Koefisien perpindahan panas keseluruhan ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

A : Luas perpindahan panas keseluruhan (m^2)

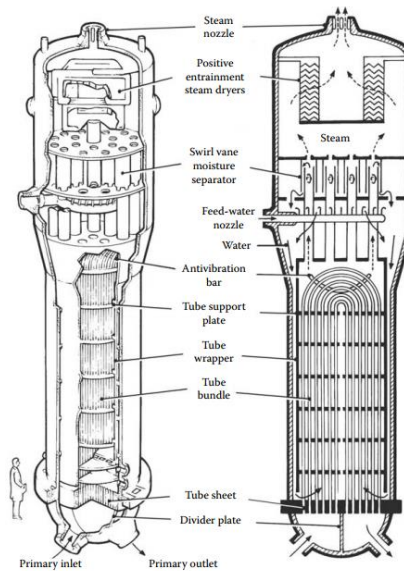
ΔT_{LMTD} : *Log Mean Temperature Difference* ($^\circ\text{C}$)

Terdapat berbagai macam tipe *heat exchanger*, pada *plant* nuklir ini tipe *heat exchanger* yang digunakan menggunakan tipe *shell-and-tube heat exchanger*. *Shell-and-tube heat exchanger* terbuat dari beberapa *tube* yang terpasang pada sebuah kerangka atau *shell*.



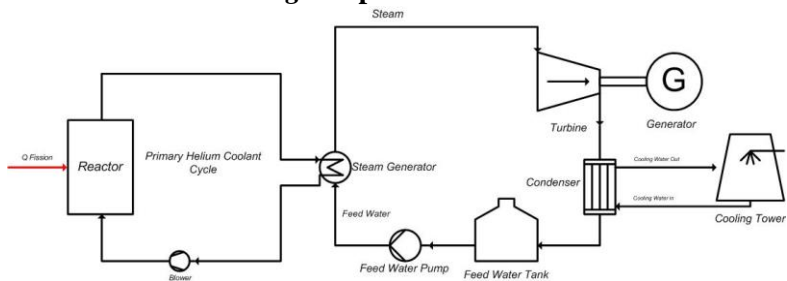
Gambar 2. 9 Bentuk dasar *shell-and-tube heat exchanger*[15]

Pada Gambar 2.9 merupakan bentuk dasar dari sebuah *shell-and-tube heat exchanger*. Pada *plant* pembangkit nuklir ini menggunakan tipe *inverted u-tube steam generator*.



Gambar 2. 10 *Steam generator* pada *plant* nuklir [15]

2.4.4 Process Flow Diagram pada PLTN HTGR



Gambar 2. 11 *Process Flow Diagram* RDE HTGR

Siklus PLTN *HTGR* terdiri dari tiga *loop* yaitu *loop* primer yang merupakan *loop coolant* dari reaktor berupa gas *Helium*, kemudian *loop* sekunder berupa air dalam bentuk cair dan uap, serta *loop* ketiga yaitu *loop* air pendingin. Pembangkit ini merupakan Reaktor Daya Eksperimental (RDE), karena bersifat eksperimental maka daya elektrik keluarannya hanya sebesar 3 MW elektrik yang dihasilkan dari daya panas dari reaktor sebesar 10 MW termal.

Pada *loop coolant* reaktor, gas *Helium* masuk dengan suhu 250 °C dan dengan laju aliran sebesar 4,4 kg/s. Gas *Helium* ini kemudian memasuki reaktor. Di dalam reaktor ini terdapat bahan bakar uranium yang terbungkus dalam partikel-partikel yang dinamakan TRISO (*Tri-Isotropic*) *coated particle* berupa bola-bola kecil yang dilapisi dengan grafit yang berfungsi sebagai moderator dari reaksi fisi ini. Gas *Helium* dilewatkan pada partikel-partikel bahan bakar ini. Jumlah bahan bakar dalam teras reaktor berjumlah 27.000 *pebble* dengan diameter 6 cm. Di dalam reaktor ini gas *Helium* akan mengalami perubahan entalpi sebesar 2.337.750 J/kg dan mengalami kenaikan suhu saat keluar dari reaktor hingga mencapai 700 °C. Untuk mengendalikan reaksi yang terjadi terdapat batang kendali (*control rods*) yang berfungsi untuk mengatur berapa banyak reaksi yang terjadi. Batang kendali pada reaktor HTGR ini menggunakan bahan *Boron* yang bersifat menyerap neutron yang akan menumbuk atom Uranium untuk menginisiasi reaksi fisi. Sistem batang kendali ini adalah dengan menggerakkan naik dan turun ke dalam reaktor sehingga bisa membatasi reaksi yang terjadi. Semakin dalam batang kendali masuk ke reaktor maka semakin sedikit reaksi fisi yang terjadi, semakin tinggi batang kendali terangkat maka akan semakin banyak reaksi fisi yang terjadi.

Pada *steam generator* ini merupakan *shell and tube heat exchanger*. Pada *steam generator* ini terjadi perpindahan energi dari *coolant* primer (gas *Helium*) dengan fluida kerja berupa air pada siklus sekunder. Gas *Helium* dengan suhu 700 °C memasuki

inlet *tube steam generator*, dan air umpan dengan suhu 160 °C dan laju alir 4 kg/s memasuki inlet *shell steam generator*. Air akan dipanaskan hingga menjadi uap dengan suhu 530 °C dan tekanan 60 bar. Uap ini akan langsung menuju turbin yang akan memutar generator yang akan menghasilkan daya elektrik sebesar 3 MW.

Fluida kerja setelah melewati turbin ini kemudian masuk ke kondensor untuk didinginkan oleh *loop* air pendingin yang didinginkan oleh menara pendingin dari uap menjadi air kembali. Sistem *loop* air pendingin ini memiliki laju alir 1.240 m³/jam dengan suhu 32 °C. Air *loop* sekunder keluaran dari kondensor ini kemudian akan menuju *feed water tank* untuk kemudian akan diumpankan lagi menuju *steam generator*.

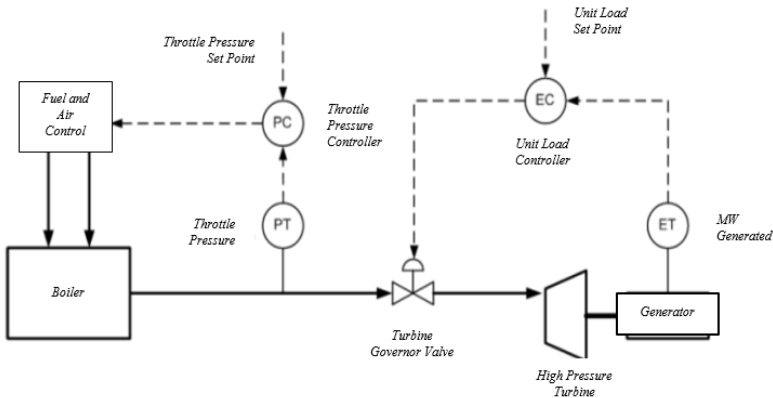
2.5 Strategi Kontrol Power Plant

Dasar kontrol boiler-turbin adalah memproduksi tenaga listrik untuk memenuhi kebutuhan beban dengan menjaga keseimbangan pada proses unit. Pada dasarnya, proses kontrol yang dilakukan pada pembangkit listrik tenaga uap yaitu mengatur aliran *steam* yang keluar pada boiler menuju *inlet* turbin, dan mengatur beban listrik yang dibutuhkan oleh turbin-generator. Strategi kontrol pembangkit listrik tenaga nuklir yang akan digunakan pada tugas akhir ini menggunakan referensi strategi kontrol pembangkit listrik tenaga uap dengan beberapa penyesuaian. *Boiler* yang dapat digantikan dengan reaktor nuklir. Terdapat tiga strategi kontrol yaitu *Boiler Following Mode*, *Turbine Following Mode*, dan *Coordinated Control Mode*

2.5.1 Boiler Following Mode (BFM)

Pada mode ini *boiler* menunggu aksi dari turbin untuk menyesuaikan permintaan pembangkit, kemudian *governor valve* akan membatasi aliran yang akan masuk ke dalam turbin sesuai dengan permintaan beban. Lalu *boiler* mengendalikan perubahan tekanan *steam* dari *set point* digunakan untuk mengendalikan proses pembakaran *boiler* dengan membatasi aliran bahan bakar dan udara masukkan pada ruang bakar [16].

Kelebihan dari mode ini adalah respon yang cepat pada perubahan beban. Sedangkan, kekurangan dari mode ini yaitu sangat dimungkinkan pada *boiler* terjadi *overshoot*, karena respon boiler memerlukan waktu untuk menyesuaikan dengan repon pada turbin [16]. Gambar dibawah menunjukkan skema dari *Boiler Following Mode* (BFM).



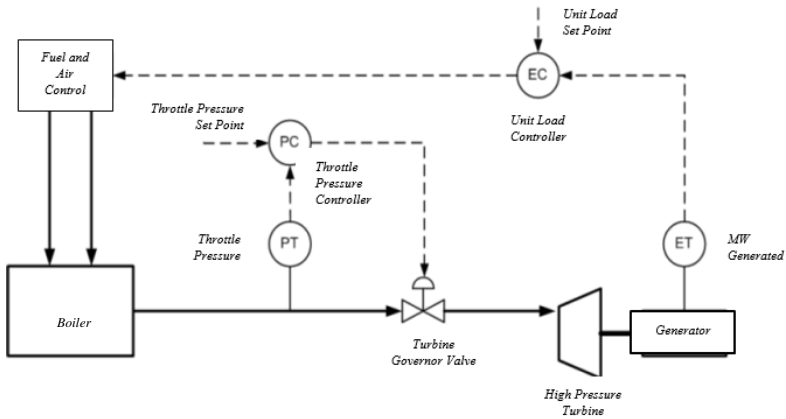
Gambar 2. 12 Skema *Boiler Following Mode* [16]

2.5.2 Turbine Following Mode (TFM)

Konsep dari strategi kontrol *Turbine Following Mode* (TFM) yaitu aksi turbin mengikuti aksi dari *boiler* yang disesuaikan dengan permintaan pembangkit.

Pada *Turbine Following Mode* (TFM) permintaan beban digunakan untuk mengendalikan pembakaran *boiler*, dengan cara mengatur aliran udara dan bahan bakar yang memasuki ruang bakar untuk memodifikasi *steam* yang dihasilkan. Kemudian respon dari kontrol turbin menyebabkan pengaturan bukaan pada *governor valve* agar sesuai dengan nilai *set point* tekanan [16].

Kelebihan dari mode ini adalah respon yang dihasilkan stabil. Meskipun demikian, kekurangan pada mode ini perubahan beban tergantung pada aksi dari *boiler*, sehingga waktu respon yang dihasilkan lama. Dibawah ini merupakan skema dari *Turbine Following Mode* (TFM).

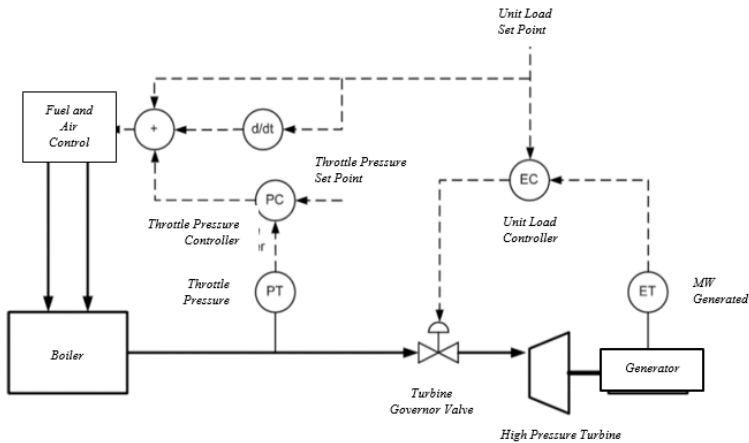


Gambar 2. 13 Skema *Turbine Following Mode* [16]

2.5.3 Coordinated Control Mode (CCM)

Pada strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM) permintaan daya diberikan secara bersamaan pada kontrol boiler dan turbin. Kontrol daya dengan mengendalikan bukaan *governor valve* pada inlet *steam* pada turbin. Kemudian kontrol *pressure* diatur pada boiler dengan kontrol *feedforward* yang berhubungan dengan permintaan daya.

Selain itu strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM) juga mengadopsi kelebihan dan meminimalisasi kekurangan dari strategi kontrol adalah *Boiler Following Mode* (BFM), dan strategi kontrol *Turbine Following Mode* (TFM) yang telah dijelaskan sebelumnya. Mode ini memiliki stabilitas respon kontrol layaknya *turbine following mode*, namun juga memiliki kecepatan respon seperti halnya *boiler following* [16]. Berikut ini adalah gambar skema strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM).



Gambar 2. 14 Skema *Coordinated Control Mode* [16]

2.5 *Economic PlantWide Control*

PlantWide Control (PWC) adalah sebuah sistem dan strategi yang diperlukan untuk mengendalikan keseluruhan *plant* yang terdiri dari unit operasi yang saling berinteraksi. Salah satu yang paling penting dan tantangan pada kontrol adalah bagaimana mendesain *loop* kontrol dan sistem yang dibutuhkan untuk menjalankan proses. Kita biasanya dihadapkan pada proses dengan *flowsheet* yang rumit terdiri dari beberapa *recycle stream*, energi integrasi, dan beberapa unit operasi yang berbeda-beda: *distillation column*, *reactor*, *pump*, *compressor*, *tank*, *absorber*. *Control engineer* harus memberikan saran untuk menentukan *logic*, instrumentasi, dan strategi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan *plant* dengan aman dan sesuai dengan tujuan desain *plant* tersebut.

Tiga hal dasar yang ada pada proses kimia yang terintegrasi yang dibutuhkan untuk menggunakan sistem kontrol keseluruhan *plant*: (1) pengaruh dari *material recycle*, (2) pengaruh dari energi yang terintegrasi, dan (3) kebutuhan inventori komponen kimia. Jika tidak ada 3 permasalahan tersebut pada *plant*, maka tidak perlu menggunakan *PWC* yang rumit.

Dalam mendesain sistem *PWC* terdapat 4 tahapan utama:

- a. Spesifikasi keseluruhan *plant* dan sistem kontrol telah disebutkan.
- b. Pengembangan struktur sistem kontrol. Pada tahap ini termasuk memilih variabel yang dikontrol, yang diukur dan dimanipulasi; memilih *multiloop* atau *multivariable control*: menentukan bagaimana mengendalikan laju produksi, kualitas produk, inventories dan mengatasi batasan dari operasi. Dekomposisi permasalahan PWC menjadi lebih sederhana untuk dapat dianalisis.
- c. Desain diikuti dengan spesifikasi detail dari keseluruhan instrumentasi/*hardware* dan *software*, estimasi biaya, mengevaluasi cara alternatif, dan instalasi peralatan.
- d. Tahap desain dan pembangunan *plant*, uji *plant*, meliputi startup, kondisi desain operasi, *shutdown*, yang ada pada tahap *commissioning*.

PWC yang digunakan pada penelitian ini adalah metode PWC Skogestad. Metode ini terinspirasi dari metode PWC Luyben. Namun dalam metode ini jelas dipisahkan antara bagian *top-down* (kondisi *steady state* untuk menentukan *economic*) dan bagian *bottom-up* (utamanya berhubungan dengan kestabilan dan pasangan *loop*). Adapun metode Skogestad terdapat beberapa langkah, diantaranya sebagai berikut:

I Top–Down (fokus pada operasi optimal kondisi *steady*)

Step S1. Mendefinisikan tujuan operasional (fungsi *cost* ekonomi dan batasan)

Step S2. Mengidentifikasi *steady state degree of freedom* u dan menentukan kondisi operasi *steady state* yang optimal dan termasuk *active constraints*.

Step S3. Menentukan variabel yang diukur y dan memilih variabel utama yang dikontrol $CV_1 = H_1y$

Step S4. Menentukan lokasi *ThroughPut Manipulator* (TPM)

II Bottom-up (fokus pada bagian struktur *control*)

Step S5. Memilih struktur dari *regulatory* (kestabilan) kontrol

- Memilih ‘kestabilan’ *variable control* $CV_2 = H_2y$

- Memilih input (*valve*) dan pasangan *control* untuk mengendalikan CV_2

Step S6. Memilih struktur kontrol dari *supervisory control*

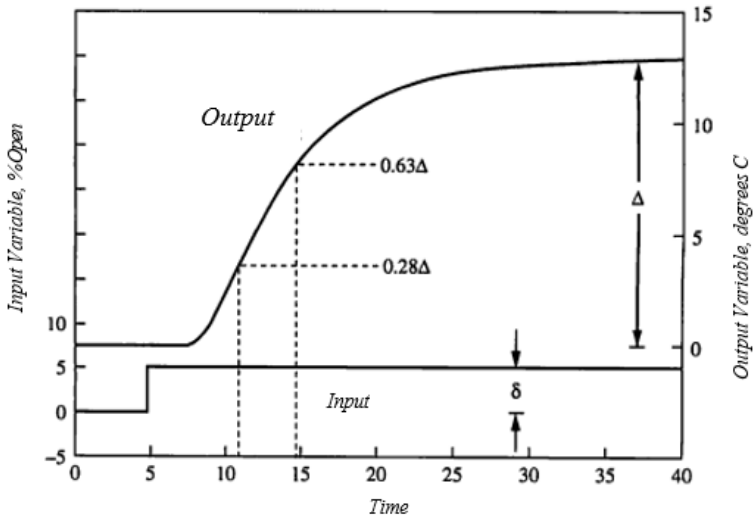
Step S7. Menentukan struktur (atau kebutuhan) layer optimasi

Pada bagian *top down* (S1-S4) utamanya berkenaan dengan ekonomi, dan pertimbangan *steady state* sering tepat. Pertimbangan dinamik lebih penting untuk S5-S7, meskipun pertimbangan *steady state* juga penting.

2.6 First Order Plus Dead Time (FOPDT)

Dalam memodelkan sebuah proses dinamik, dibutuhkan sebuah permodelan FOPDT dari proses tersebut. Parameter-parameter yang didapatkan dari grafik FOPDT atau grafik reaksi proses. Dengan memberikan masukan *step* pada proses dan mencatat variabel *output* sebagai fungsi waktu, maka dapat dibuat kurva reaksi proses yang menghubungkan antara waktu dengan variabel *output*. Adapun langkah dalam pembuatan kurva reaksi proses adalah sebagai berikut:

- a) Mengkondisikan proses untuk mencapai kondisi *steady*
- b) Memberikan perubahan *step* pada variable input
- c) Merekam respon input dan output sampai proses mencapai keadaan *steady* kembali
- d) Menjalankan perhitungan dengan metode kurva reaksi proses



Gambar 2. 15 Grafik *FOPDT* [17]

Perhitungan grafik menghasilkan parameter-parameter untuk FOPDT. Persamaan FOPDT antara *input* $X(s)$ dan *output* $Y(s)$ adalah sebagai berikut

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2.6)$$

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta} \quad (2.7)$$

$$\tau = 1.5 (t_{63\%} - t_{28\%}) \quad (2.8)$$

$$\theta = t_{63\%} - \tau \quad (2.9)$$

Nilai yang di plot dalam grafik dapat berhubungan dengan parameter model berdasarkan pada persamaan FOPDT sebagai berikut. Model umum untuk *input step* dengan $t \geq 0$ adalah:

$$Y'(t) = K_p \delta [1 - e^{-(t-\theta)/\tau}] \quad (2.10)$$

Dimana:

K_p : Gain *steady state*

$Y'(t)$: Fungsi alih dalam domain waktu

Δ : Perubahan *steady state* pada variabel proses

δ : Perubahan *step* pada masukan

$t_{28\%}$: Nilai variabel proses ketika mencapai 28% dari nilai akhir

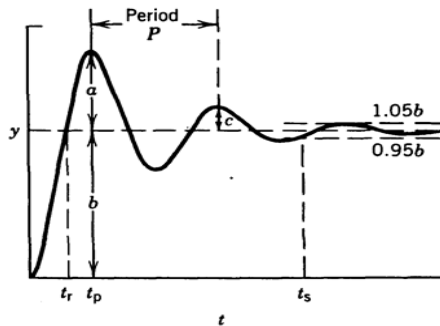
$t_{63\%}$: Nilai variabel proses ketika mencapai 63% dari nilai akhir

τ : *Time constant*

θ : *Dead time*

2.7 Analisa Performansi Kontrol

Analisa performansi kontrol merupakan analisa yang dilakukan secara kuantitatif untuk memperoleh nilai performansi dari kontrol. Pada Gambar 2.16 ditunjukkan parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan analisa performansi kontrol.



Gambar 2. 16 Analisa karakteristik performansi kontrol [18]

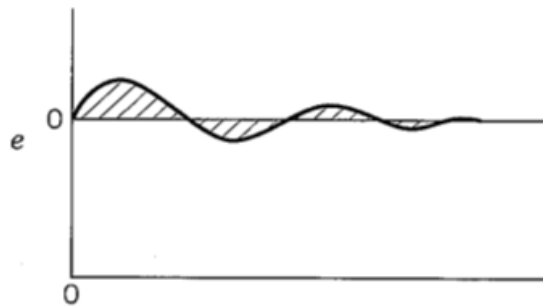
Berdasarkan gambar 2.13 di atas, parameter yang dibutuhkan dalam melakukan analisa performansi kontrol antara lain [18]:

- Nilai *settling time* (t_s), waktu saat *output* proses mencapai lebar pita $\pm 5\%$ dari perubahan total *output* proses.
- *Maximum overshoot*, dengan perhitungan nilai sebagai berikut.

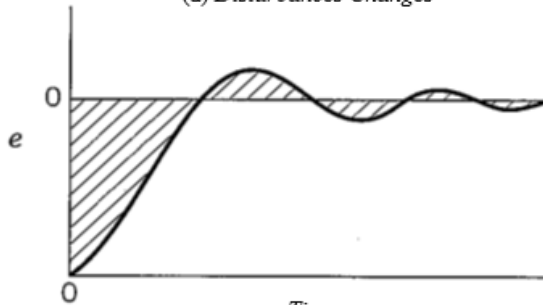
$$OS = \frac{a}{b} \times 100\% \quad (2.11)$$

- Nilai IAE (*Integral Absolute Error*) adalah penjumlahan nilai *absolute error* dari *output* proses, nilai IAE diinterpretasikan pada area yang diarsir seperti pada Gambar 2.17 di bawah. Nilai IAE dihitung seperti pada persamaan (2.12) berikut.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.12)$$



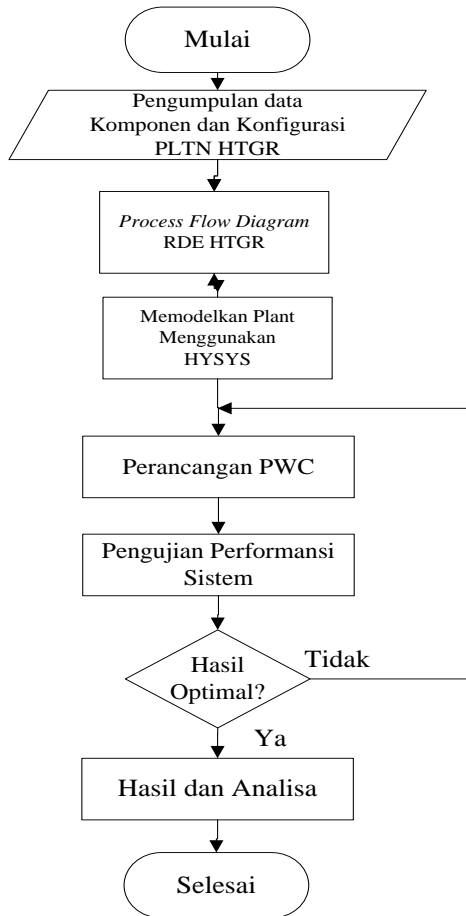
(a) *Disturbances Changes*



(b) *Set point change*

Gambar 2. 17 Interpretasi IAE pada (a) uji *disturbance*, dan (b) uji *set point* [18]

BAB III METODOLOGI

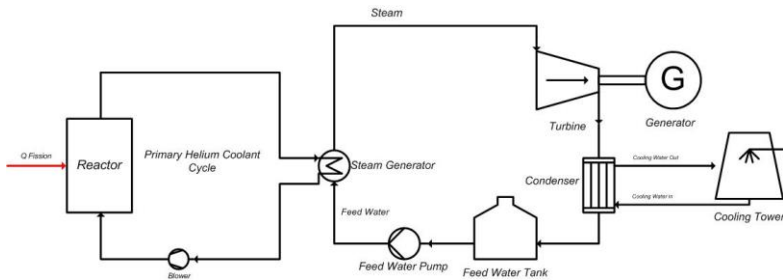


Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.1 Pengumpulan Data Komponen dan Konfigurasi *Plant* PLTN

Pada tugas akhir kali ini, pemodelan yang digunakan menggunakan software Aspen HYSYS 8.8. *Plant* PLTN yang digunakan adalah Reaktor Daya Eksperimental yang akan dibangun di Serpong. Data yang digunakan adalah data desain konseptual dari *plant* yang akan dibangun.

Berikut merupakan *process flow diagram* desain *High Temperature Gas-cooled Reactor Nuclear Power Plant*.



Gambar 3. 2 Process Flow Diagram HTGR NPP

Sumber panas pada *plant* ini berasal dari reaksi fisi yang terjadi di dalam inti reaktor. Terdapat 3 *loop* pada *plant* ini yaitu *loop* primer, *loop* sekunder, dan *loop* tersier. Pada *loop* primer merupakan gas *Helium* bersuhu tinggi yang berfungsi sebagai *coolant* reaktor dan grafit sebagai *moderator* bagi partikel bahan bakar uranium. Gas *Helium* dengan suhu 250 °C dengan laju alir 4,4 kg/s memasuki inlet reaktor yang kemudian dipanaskan oleh inti reaktor dengan daya termal 10 MWth di dalam reaktor vessel dan keluar dengan suhu 700 °C untuk kemudian menuju *steam generator* untuk kemudian memanaskan fluida kerja pada *loop* sekunder. Pada *steam generator* pada bagian tube dilewati oleh *coolant* reaktor (gas *Helium*). Pada bagian inlet *steam generator*, air umpan dengan temperatur 160 °C, kemudian memasuki bagian *shell* dari *steam generator*. Air ini akan dipanaskan oleh gas *Helium* hingga keluar dari *steam generator* mencapai fase

superheated steam dengan suhu 530 °C dan tekanan 60 bar. *Superheated steam* ini akan menuju turbin dimana turbin ini akan memutar generator untuk menghasilkan listrik sebesar 3 MWe. *Steam* yang telah melewati turbin kemudian akan memasuki kondenser yang didinginkan oleh sistem *loop* ketiga yaitu air pendingin yang didinginkan oleh menara pendingin. Air yang ada pada kondenser ini kemudian dipompa menuju *feed water* tank untuk kemudian dipompa kembali menuju *feed* dari *steam generator*.

Tabel 3. 1 Data *Properties* RDE HTGR

Data Utama Instalasi	
Jenis reaktor nuklir	HTGR
Jumlah reaktor	1
Daya listrik keluaran	~ 3 MWe
Daya termal keluaran teras	~ 10 MWth
Sistem Penghasil Uap	
Laju aliran massa uap	~ 4,0 kg/s
Laju aliran massa <i>Helium</i>	~ 4,4 kg/s
Temperatur Uap	~ 530 °C
Tekanan uap	~ 60 bar
Temperatur air umpan	~ 160 °C
Sistem Pendingin Reaktor (<i>Coolant</i> Reaktor)	
Jenis pendingin primer	<i>Helium</i>
Laju alir pendingin primer	4,4 kg/s
Tekanan operasi reaktor	30 bar
Temperatur <i>inlet coolant</i>	250 °C
Temperatur <i>outlet coolant</i>	700 °C
Jumlah dan jenis <i>loop</i>	1 (tertutup)
Teras Reaktor	
Tinggi aktif teras	2 m
Diameter teras	1,8 m
Kondensor	
Laju alir air pendingin	1240 m ³ /jam
Temperatur air pendingin	32 °C
Temperatur outlet pendingin	37 °C
Tekanan <i>cooling tower</i>	Atmosfir

3.2 Memodelkan *plant* PLTN menggunakan Aspen HYSYS 8.8

Setelah mengetahui PFD dari RDE HTGR maka dilakukan pemodelan PLTN menggunakan HYSYS berdasarkan data *properties* yang ada, pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui proses yang terjadi pada *plant*. Setelah pembuatan proses *plant* RDE pada keadaan *steady state*, langkah selanjutnya mengubah proses dari *steady state* ke dinamik, karena pada kondisi nyata sebuah proses akan berubah terhadap waktu.

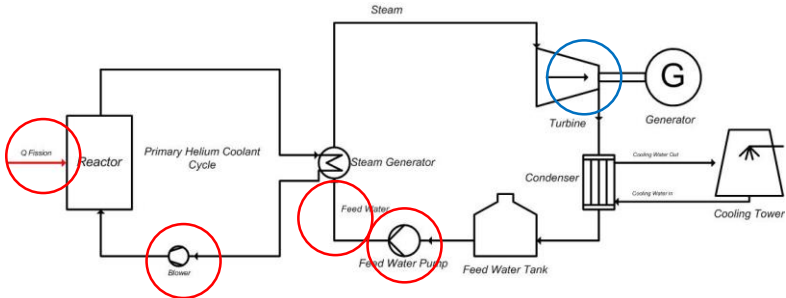
3.3 Perancangan *Economic PlantWide Control*

Perancangan PWC ini menggunakan *Economic PlantWide Control* (EPWC) milik Skogestad karena tujuannya untuk memaksimalkan profit dan merancang *plant* yang stabil. Pada perancangan EPWC ini terdapat tujuh langkah yang dibagi menjadi dua bagian, yaitu *top down* yang berfokus pada sisi ekonomis *plant*, sedangkan bagian kedua yaitu *bottom up* berfokus pada bagaimana mendapatkan sistem kontrol yang sederhana dan *robust* yang dapat bekerja pada kondisi paling ekonomis [19].

3.3.1 Bagian *Top-Down* metode Skogestad

Step 1 Menentukan tujuan operasional

Pendekatan sistematis untuk *plantwide control* membutuhkan persamaan untuk *cost function J* (IDR/h). Pada *economic plantwide control* terdapat 2 mode: mode 1: meminimalkan konsumsi energi, mode 2: memaksimalkan produk. Pada RDE ini tujuannya untuk memaksimalkan profit. Persamaan fungsi objektif ini terdapat tiga variabel utama yang digunakan, yaitu harga produk, biaya utilitas, dan biaya bahan baku. Pada harga produk merupakan hasil energi listrik keluaran turbin. Biaya utilitas disini terdapat pada daya yang dibutuhkan pompa air umpan utama dan blower pada *loop* primer. Biaya bahan baku terdapat dua variabel yaitu biaya bahan baku uranium yang dibutuhkan dan biaya dari *demineralized water* yang digunakan sebagai air umpan.



Gambar 3. 3 Variabel-variabel utama pada fungsi objektif

Berdasarkan variabel-variabel harga produk, biaya utilitas, dan biaya bahan baku yang telah ditentukan sebelumnya, maka didapatkan persamaan fungsi objektif sebagai berikut

$$J = \text{Value Product (IDR/h)} - \text{Cost Feed (IDR/h)} - \text{Cost Utilities (IDR/h)}$$

$$J = p_P \cdot P - p_u \cdot Q - p_w \cdot W \quad (3.1)$$

Keterangan:

J : Fungsi profit (IDR/h)

p_P : Harga daya (IDR/ kwh)

P : Daya yang dihasilkan (kw)

p_u : Harga Uranium (IDR/kW)

Q : Daya termal reaktor (kWh)

p_w : Biaya demineralized water (IDR/m³)

W : Laju aliran massa air (m³/h)

Step 2 Menentukan operasi optimal kondisi *steady state*

Pada saat menentukan kondisi *steady state* optimal, hal yang pertama dibutuhkan adalah model *steady state*. Setelah itu dilakukan identifikasi *degree of freedom* berdasarkan PFD dari *plant*, identifikasi *disturbance d* dan *range disturbance* yang diinginkan.

Setelah menganalisa CDOF, selanjutnya adalah mengidentifikasi dimana *disturbance* yang dapat terjadi pada *plant*. Pada *loop* primer *coolant* reaktor sifatnya tertutup, dimana aliran keluaran gas *Helium* dari *steam generator* akan menjadi input bagi reaktor. Jadi penurunan suhu gas *Helium* pada input reaktor dapat mempengaruhi *output* daya dari RDE. Nilai *disturbance* yang dapat terjadi yaitu penurunan suhu hingga mencapai 25°C.

Step 3 Memilih variabel (*primary*) *economic* yang dikontrol

Penentuan variabel *economic* primer yang dikontrol berdasarkan pada variabel yang berpengaruh langsung terhadap fungsi objektif pada step 1 yang memiliki orientasi terhadap profit. Pada fungsi objektif, terdapat beberapa variabel yang mempengaruhi sisi ekonomi, yaitu daya keluaran turbin sebagai profit dan biaya operasional, biaya operasional ini dipengaruhi oleh aliran Q pada reaktor yang dihasilkan dari reaksi fisi uranium, kemudian aliran *feed water*, dan daya pada pompa dan blower.

Step 4 Memilih lokasi dari TPM (*ThroughPut manipulator*)

Tujuan utama sebuah *plant* adalah merubah bahan baku menjadi produk yang menghasilkan profit dan melibatkan massa yang melewati *plant*. Jumlah massa yang dilewatkan melalui *plant*, di ekspresikan dengan laju aliran atau produk, dengan menentukan satu *degree of freedom* yang menjadi *ThroughPut Manipulator* (TPM). TPM adalah satu *degree of freedom* yang mempengaruhi beban keseluruhan *plant*. TPM pada *power plant* ini ada pada daya keluaran turbin.

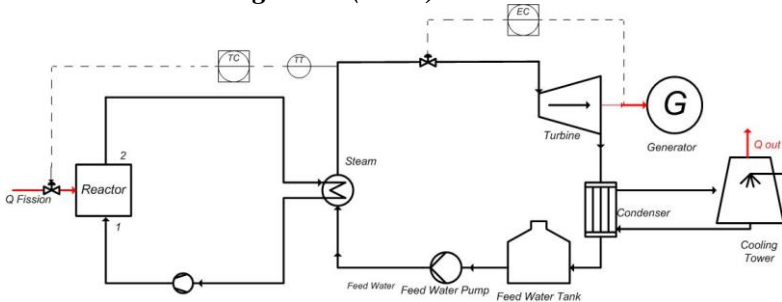
3.3.2 Bagian *Bottom Up* metode Skogestad

Step 5 Memilih struktur *regulatory control*

Pada tahap ini dilakukan *pairing* proses variabel yang dikontrol dengan *manipulated variable*. Berdasarkan analisa CDOF tadi dua variabel utama yang dapat dimanipulasi adalah Q pada reaktor dan aliran massa dari *feed water*. Kemudian dua variabel utama yang dikontrol adalah daya keluaran turbin dan temperatur dari uap keluaran *steam generator*.

Variabel-variabel yang dapat dikontrol ini menghasilkan tiga tipe struktur kontrol pada *power plant* yaitu sebagai berikut

- **Boiler Following Mode (BFM)**

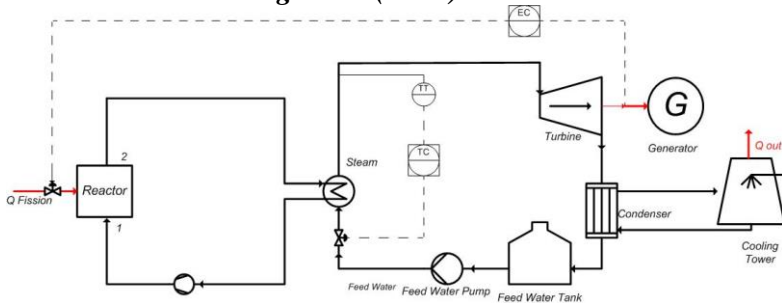


Gambar 3. 4 Struktur kontrol BFM

Pada tipe BFM ini *Boiler* dapat digantikan dengan Reaktor. Sumber energi utama pada *plant* ini adalah energi Q yang dihasilkan pada reaktor, energi Q reaktor ini digunakan untuk mentransfer energi panas hasil reaksi fisi ke aliran gas *Helium*. Gas *Helium* bersuhu tinggi ini digunakan untuk memanaskan aliran air umpan menjadi *steam*. Variabel proses utama yang dikendalikan adalah daya yang dihasilkan turbin. Untuk mengendalikan daya turbin ini, variabel yang dimanipulasi adalah laju aliran *steam* masukan dari turbin. Pada aliran *steam* diberi *governor valve* yang digunakan untuk memanipulasi aliran dari *steam* yang masuk ke turbin. Jika *set point* daya dinaikkan, maka aliran *steam* harus ditambah, sehingga *governor valve* akan membuka lebih besar. Jika *set point* daya diturunkan maka *governor valve* akan mengurangi bukaan sehingga aliran *steam* yang masuk ke turbin berkurang. Karena daya yang dihasilkan ini dikendalikan dengan memanipulasi laju aliran *steam*, maka perubahan permintaan daya dapat diatur dengan cepat. Variabel proses lainnya yang harus dikendalikan adalah temperatur dari *steam* ini dijaga pada suhu 530 °C agar tetap pada kondisi superheated. Untuk menjaga suhu *steam* (variabel proses) ini tetap pada suhu 530 °C, maka variabel yang dimanipulasi adalah aliran energi Q pada reaktor. Jika aliran massa

bertambah, maka dibutuhkan energi reaktor yang lebih tinggi untuk memanaskan gas *Helium* yang kemudian digunakan untuk memanaskan aliran air umpan ini agar temperatur *steam* dapat terjaga pada suhu 530 °C.

- ***Turbine Following Mode (TFM)***

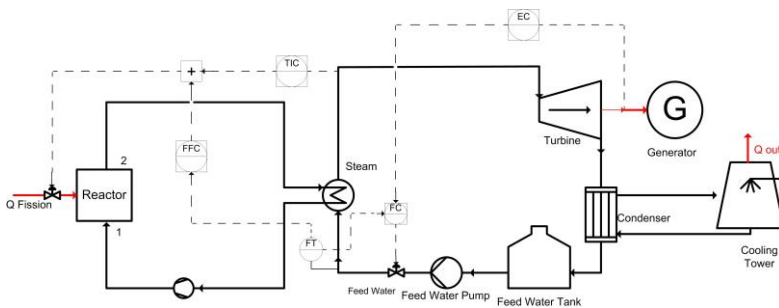


Gambar 3. 5 Struktur kontrol TFM

Pada tipe *Turbine Following Mode* (TFM) ini aksi turbin akan mengikuti aksi dari reaktor untuk menyesuaikan permintaan pembangkit. Sumber energi utama yaitu energi Q reaktor ini digunakan untuk memanaskan aliran gas *Helium*. Kemudian, gas *Helium* bersuhu tinggi ini mentransfer panas ke aliran air umpan hingga berubah menjadi *steam* berenergi tinggi yang digunakan untuk menggerakkan turbin. Kontrol daya yang dihasilkan pada turbin ini dikendalikan dengan memanipulasi aliran energi utama yaitu energi Q reaktor. Kenaikan *set point* daya, maka dibutuhkan energi Q reaktor yang lebih tinggi. Meningkatnya energi reaktor ini akan memanaskan gas *Helium* lebih tinggi dengan asumsi laju aliran *Helium* yang konstan. Kenaikan energi *Helium* ini akan menaikkan energi dari *steam* yang kemudian menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi. Kemudian variabel proses lainnya yaitu temperatur *steam* dikendalikan dengan memanipulasi aliran dari air umpan. Pada aliran inlet dari *steam generator* pada bagian air umpan diberi *control valve* yang digunakan untuk mengendalikan aliran air umpan sebagai *manipulated variabel* dari kontrol temperatur *steam*. Jika ada peningkatan temperatur dari *Helium*

akibat permintaan daya, maka temperatur dari *steam* akan meningkat, untuk menjaga temperatur *steam* tetap pada 530 °C maka aliran massa dari air umpan ditambahkan, untuk menambah aliran massa air umpan ini maka *control valve* pada aliran air umpan diperbesar.

- **Coordinated Control Mode (CCM)**



Gambar 3. 6 Struktur kontrol CCM

Pada mode *coordinated control mode set point* daya dikendalikan dengan memanipulasi laju aliran *steam*. Ketika ada kenaikan permintaan daya, maka dibutuhkan energi *steam* yang lebih besar karena energi dari *steam* ini sebanding dengan aliran massa *steam* yang masuk, maka yang diperlukan adalah menambah aliran massa dari air umpan sehingga pada strategi kontrol ini diperlukan *flow controller* pada aliran air umpan dengan *control valve* diletakkan pada aliran air umpan. Untuk menambah aliran massa air umpan ini maka *control valve* dibuka lebih besar agar aliran massa air umpan bertambah. Pada kontrol daya ini dipasang kontrol *cascade* dengan kontrol daya sebagai *master* dan *flow controller* berfungsi sebagai *slave*. Peningkatan permintaan daya ini akan menyebabkan kenaikan aliran massa air umpan sehingga menyebabkan temperatur dari *steam* ini akan turun, untuk menjaga temperatur tetap pada 530 °C maka dibutuhkan energi dari yang lebih tinggi dari *loop* primer. Untuk meningkatkan energi dari *loop* primer ini maka Q dari reaktor harus ditambahkan, peningkatan energi reaktor ini akan meningkatkan temperatur dari gas *Helium*,

peningkatan temperatur gas *Helium* ini akan meningkatkan kembali temperatur dari *steam* sehingga tetap pada 530°C. pada kontrol CCM ini, kontrol temperatur menggunakan kontrol *feedforward* dengan variabel *disturbance* berupa laju aliran dari air umpan. Ketika ada perubahan permintaan daya, maka laju aliran massa air umpan akan berubah sehingga secara simultan kontrol temperatur akan merespon dengan memanipulasi energi reaktor.

Step 6 Memilih struktur *supervisory control*

Supervisory control memiliki 3 tugas utama:

- mengendalikan *economic controlled variable* menggunakan *setpoint* pada *regulatory control* ditambah memanipulasi bukaan *valve* yang tidak digunakan pada *regulatory control*.
- Mengawasi performansi pada *regulatory layer*
- Mengalihkan *controlled variable* dan strategi *control* ketika terdapat *disturbance* atau perubahan harga.

Pada *plant* ini menggunakan *supervisory control* yaitu *Model Predictive Control* yang akan mengendalikan *set point* dari kontrol *regulatory* yang terdapat pada *Software Aspen HYSYS*.

Tabel 3. 3 *Gain dan Time Constant MPC*

Strategi Kontrol		Gain	Kp	τ (sekon)
BFM		G11	0.0994	4
		G12	-1.3965	16
		G21	0.2994	0.8
		G22	-0.0246	6
TFM		G11	-151.5828	13
		G12	0.0894	4.5
		G21	1252.1001	11
		G22	0.2876	7
CCM		G11	0.0953	2
		G12	-149.704	13
		G21	0.2842	0.8
		G22	124.8	6

Step 7 Struktur *layer* optimasi atau *real time optimization* (RTO)

Setelah itu, dilakukan optimisasi dengan menggunakan *Real Time Optimizer* (RTO). Pada tugas akhir ini dilakukan optimisasi menggunakan RTO yang ada pada HYSYS dengan tujuan utama untuk mencapai fungsi objektif yang telah ditentukan yaitu dengan memaksimalkan profit.

3.4 Pengujian Performansi Sistem dan Analisis

Pengujian performansi sistem ini menggunakan uji dari *disturbance* yang diberikan pada penurunan temperatur pada aliran *coolant* pada reaktor. Kemudian dilihat respon dari daya dan aliran Q pada reaktor terhadap tiga struktur kontrol.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

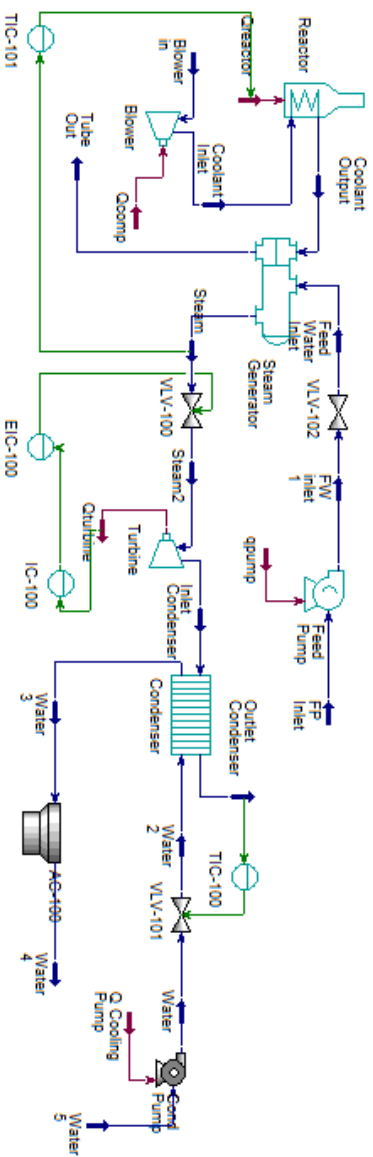
Setelah dilakukan perancangan strategi kontrol RDE, maka pada bab ini akan dibahas penerapan EPWC untuk memaksimal produk daya listrik.

4.1 Analisa Hasil Simulasi

Berdasarkan tiga tipe strategi kontrol yaitu BFM, TFM, dan CCM ini akan dibandingkan respon tiap strategi kontrol untuk membandingkan performa dari masing-masing tipe strategi kontrol. Analisa performansi ini dilakukan dengan melakukan uji *set point* dan uji *disturbance*.

4.1.1 Uji *Set Point* Strategi Kontrol *Boiler Following Mode* (BFM)

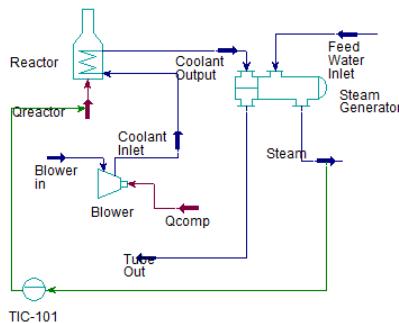
Pada Gambar 4.1 merupakan tampilan dari simulasi *plant* RDE dengan strategi kontrol BFM pada HYSYS. Pada tipe BFM ini *Boiler* dapat digantikan dengan Reaktor. Variabel proses utama yang dikendalikan adalah daya yang dihasilkan turbin. Untuk mengendalikan daya turbin ini, variabel yang dimanipulasi adalah laju aliran *steam* masukan dari turbin. Pada aliran *steam* diberi *governor valve* yang digunakan untuk memanipulasi aliran dari *steam* yang masuk ke turbin. Jika *set point* daya dinaikkan, maka aliran *steam* harus ditambah, sehingga *governor valve* akan membuka lebih besar. Jika *set point* daya diturunkan maka *governor valve* akan mengurangi bukaan sehingga aliran *steam* yang masuk ke turbin berkurang. Variabel proses lainnya yang harus dikendalikan adalah temperatur dari *steam* ini dijaga pada suhu 530 °C agar tetap pada kondisi superheated. Untuk menjaga suhu *steam* (variabel proses) ini tetap pada suhu 530 °C, maka variabel yang dimanipulasi adalah aliran energi *Q* pada reaktor. Jika aliran massa bertambah, maka dibutuhkan energi reaktor yang lebih tinggi untuk memanaskan gas *Helium* yang kemudian digunakan untuk memanaskan aliran air umpan ini agar temperatur *steam* dapat terjaga pada suhu 530 °C



Gambar 4.1 Remodelan strategi kontrol *Boiler Following Mode* pada HYSYS

- **Kontrol Temperatur *Steam* (TIC-101)**

Temperatur *steam* keluaran dari *steam generator* dikendalikan oleh kontrol temperatur TIC-101 dengan MV yaitu Q Reaktor. Pada kondisi riil aktuator dari kontrol temperatur *steam* adalah batang kendali yang terdapat pada reaktor yang berfungsi untuk memanipulasi jumlah reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor. Temperatur dari *steam* ini harus dikendalikan karena untuk menjaga kondisi dari *steam* untuk tetap pada kondisi *superheated steam*.



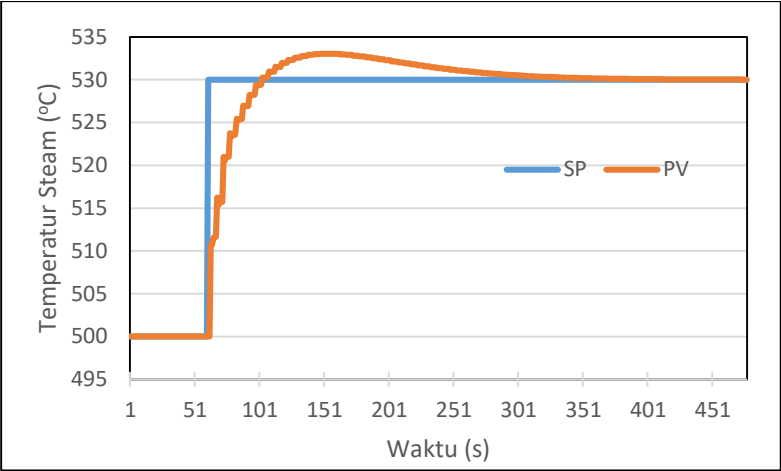
Gambar 4. 2 *Loop* kontrol temperatur pada BFM

Setelah membuat *loop* kontrol dari TIC-101, dilakukan penentuan parameter kontrol menggunakan *autotuner* yang ada pada HYSYS dengan kontrol PI. Pada kontrol TIC-100 ini terdapat *disturbance* yaitu laju aliran massa (kg/s) dari air umpan, sehingga untuk meminimalkan pengaruh *disturbance* ini diperlukan kontrol *feedforward* dengan variabel *disturbance* yaitu laju aliran massa air umpan.

Tabel 4. 1 Parameter kontrol temperatur pada BFM

P	0,195
I	0,00886

Setelah didapatkan parameter kontrol temperatur TIC-101 maka kemudian dilakukan uji perubahan *set point* dari 500 °C menjadi 530 °C.



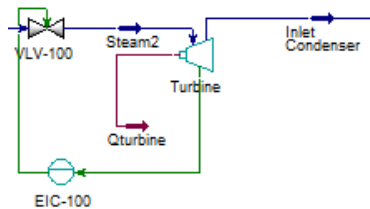
Gambar 4. 3 Grafik respon kontrol temperatur pada BFM

Dari grafik pada Gambar 4.3 di atas di dapat parameter sebagai berikut

Tabel 4. 2 Karakteristik respon kontrol temperatur BFM

Parameter	
Rise Time (sekon)	41
Settling Time (sekon)	227
Maximum Overshoot (%)	10,12
IAE	737,8

- **Kontrol Daya (EIC-100)**



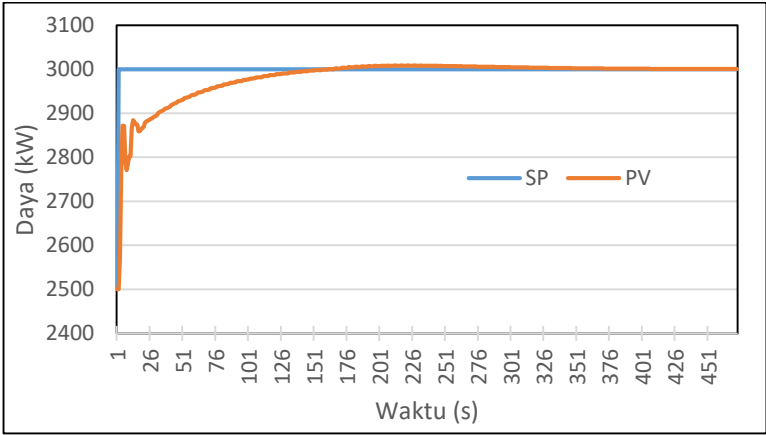
Gambar 4. 4 *Loop* kontrol daya pada BFM

Pada Gambar 4.4 merupakan *loop* kontrol daya pada BFM, dimana daya yang dihasilkan turbin sebagai PV dan terdapat *governor valve* pada aliran *steam* pada *inlet* dari turbin. Menggunakan *autotuner* didapatkan parameter P dan I sebagai berikut

Tabel 4. 3 Parameter kontrol daya BFM

P	1,44
I	0,1636

Grafik pada Gambar 4.5 merupakan grafik respon dari perubahan set point daya EIC-100 dari 2500 kW menuju 3000 kW dan didapatkan data respon daya sebagai berikut.



Gambar 4. 5 Grafik respon kontrol daya BFM

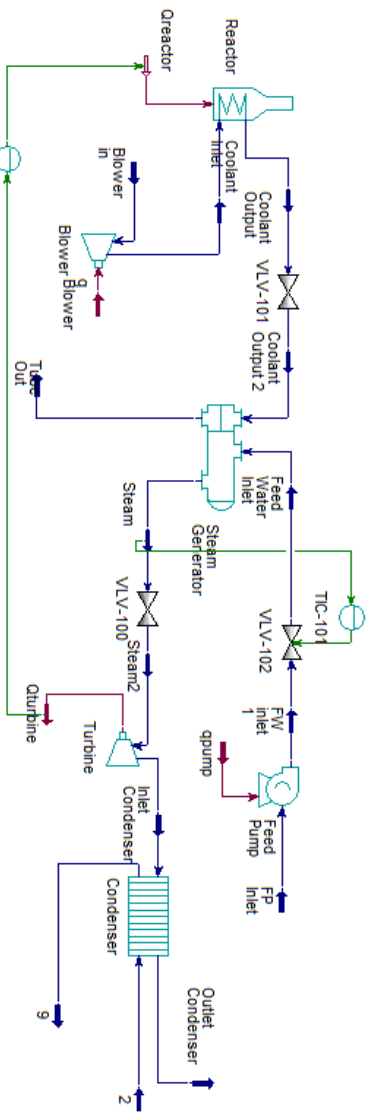
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.5 didapatkan data karakteristik respon dari kontrol daya EIC-100 pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 4 Karakteristik respon kontrol daya BFM

Parameter	
Rise Time (sekon)	64
Settling Time (sekon)	125
Maximum Overshoot (%)	1,674
IAE	10170,8

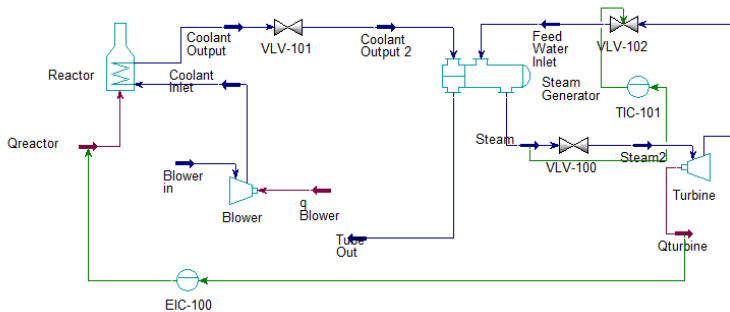
4.1.2 Uji *Set Point* Strategi Kontrol Turbine Following Mode (TFM)

Pada tipe *Turbine Following Mode* (TFM) ini aksi turbin akan mengikuti aksi dari reaktor untuk menyesuaikan permintaan pembangkit. Sumber energi utama yaitu energi Q reaktor ini digunakan untuk memanaskan aliran gas *Helium*. Kemudian, gas *Helium* bersuhu tinggi ini mentransfer panas ke aliran air umpan hingga berubah menjadi *steam* berenergi tinggi yang digunakan untuk menggerakkan turbin. Kontrol daya yang dihasilkan pada turbin ini dikendalikan dengan memanipulasi aliran energi utama yaitu energi Q reaktor. Kenaikan *set point* daya, maka dibutuhkan energi Q reaktor yang lebih tinggi. Meningkatnya energi reaktor ini akan memanaskan gas *Helium* lebih tinggi dengan asumsi laju aliran *Helium* yang konstan. Kenaikan energi *Helium* ini akan menaikkan energi dari *steam* yang kemudian menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi. Kemudian variabel proses lainnya yaitu temperatur *steam* dikendalikan dengan memanipulasi aliran dari air umpan. Pada aliran inlet dari *steam generator* pada bagian air umpan diberi *control valve* yang digunakan untuk mengendalikan aliran air umpan sebagai *manipulated variable* dari kontrol temperatur *steam*. Jika ada peningkatan temperatur dari *Helium* akibat permintaan daya, maka temperatur dari *steam* akan meningkat, untuk menjaga temperatur *steam* tetap pada 530 °C maka aliran massa dari air umpan ditambahkan, untuk menambah aliran massa air umpan ini maka *control valve* pada aliran air umpan diperbesar. Simulasi strategi kontrol TFM pada HYSYS ada pada Gambar 4.6. Pada uji *set point* dilakukan pada kontrol temperatur dan daya. Uji *set point* pada kontrol temperatur dengan merubah *set point* dari suhu awal 500 °C menjadi 530°C, dan pada uji *set point* kontrol daya dengan merubah *set point* dari 2500 kW menjadi 3000 kW. Kemudian dianalisa karakteristik responnya berdasarkan *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*-nya dan nilai IAE.



Gambar 4. 6 *Pemodelan strategi kontrol Turbine Following Mode pada HYSYS*

Kontrol Daya EIC-100



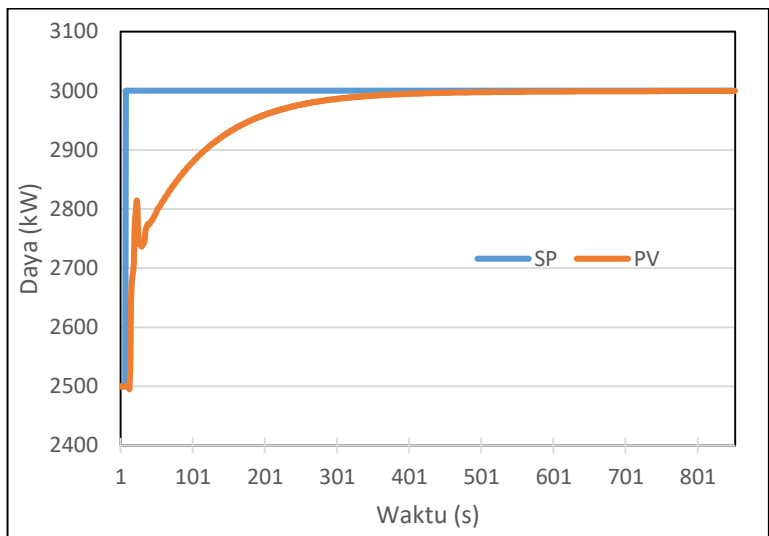
Gambar 4. 7 Loop kontrol EIC-100 TFM

Gambar 4.7 di atas merupakan *loop* kontrol daya pada TFM. Daya yang dihasilkan turbin sebagai PV dan energi pada reaktor sebagai MV. Respon daya pada strategi kontrol TFM dari perubahan setpoint dari 2500 kW menjadi 3000 kW. Dari *autotuner* yang terdapat pada HYSYS didapatkan parameter kontrol P dan I sebagai berikut.

Tabel 4. 5 Parameter kontrol daya TFM

P	0,646
I	0,01468

Berdasarkan parameter kontrol P dan I pada Tabel 4.5 didapatkan hasil respon kontrol daya pada grafik di Gambar 4.8 berikut



Gambar 4. 8 Grafik respon kontrol daya TFM

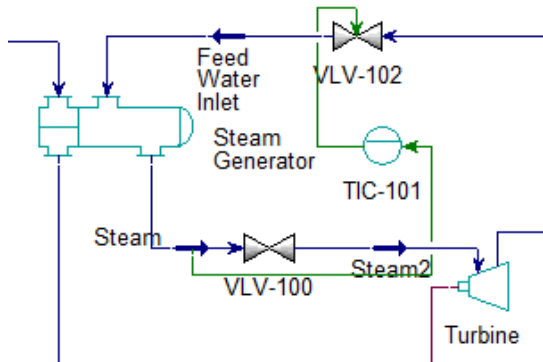
Berdasarkan grafik di atas didapatkan karakteristik respon kontrol sebagai berikut

Tabel 4. 5 Karakteristik respon kontrol daya TFM

Parameter	
Rise Time (sekon)	168
Settling Time (sekon)	320
Maximum Overshoot (%)	0
IAE	29810,5

- **Respon kontrol temperatur TIC-100 TFM**

Pada strategi kontrol TFM, temperatur *steam* sebagai PV dan pada aliran *feed water* diberi *control valve* untuk memanipulasi laju aliran *feed water*. *Loop* kontrol temperatur ada pada Gambar 4.9 di bawah.



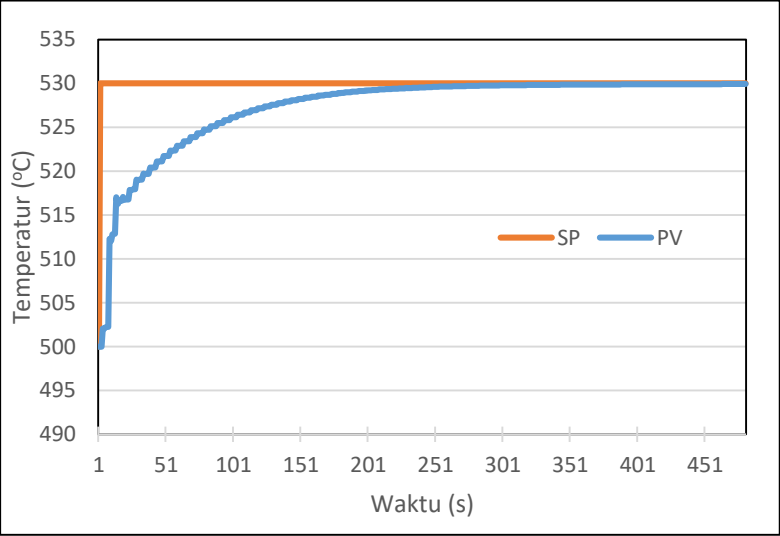
Gambar 4. 9 Loop kontrol temperatur TFM

Menggunakan *autotuner* kemudian didapatkan parameter kontrol temperatur TIC-101 adalah sebagai berikut

Tabel 4. 6 Parameter kontrol temperatur TFM

P	1,15
I	0,026
D	3,651

Setelah didapatkan parameter kontrol P, I dan D kemudian mengubah *set point* dari kontrol temperatur TIC-101 dari 500 °C menjadi 530 °C dan dianalisa responnya untuk mendapatkan karakteristik responnya.



Gambar 4. 10 Grafik respon kontrol temperatur TFM

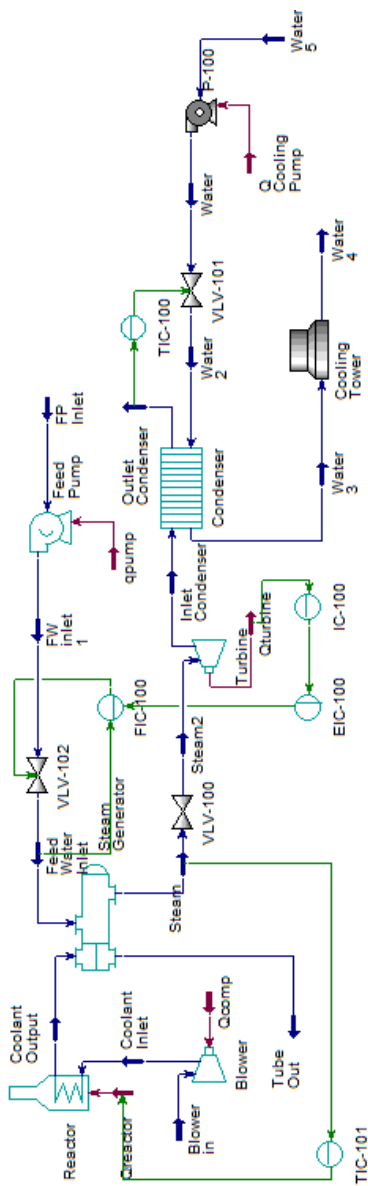
Dari hasil respon di atas kemudian dianalisa dan didapatkan karakteristik respon orde satu sebagai berikut

Tabel 4. 7 Karakteristik respon kontrol temperatur pada TFM

Parameter	
Rise Time (sekon)	111
Settling Time (sekon)	221
Maximum Overshoot (%)	0
IAE	1217,6

4.1.3 Uji Set Point Strategi Kontrol Coordinated Control Mode (CCM)

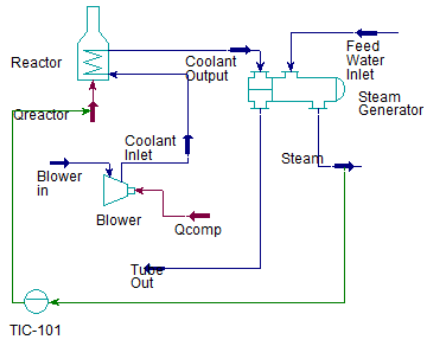
Pada strategi kontrol CCM ini mirip dengan kontrol tipe BFM, namun kontrol daya disini menggunakan *cascade control* dengan mengendalikan aliran massa dari *feed water* dengan kontrol *flow*.



Gambar 4. 11 Pemodelan strategi kontrol *Coordinated Control Mode* pada HYSYS

- **Kontrol Temperatur *Steam* (TIC-101)**

Kontrol temperatur TIC-101 CCM sama dengan BFM, namun pada CCM diberikan kontrol *feedforward* dengan variabel *disturbance* yaitu *mass flow* dari air umpan.



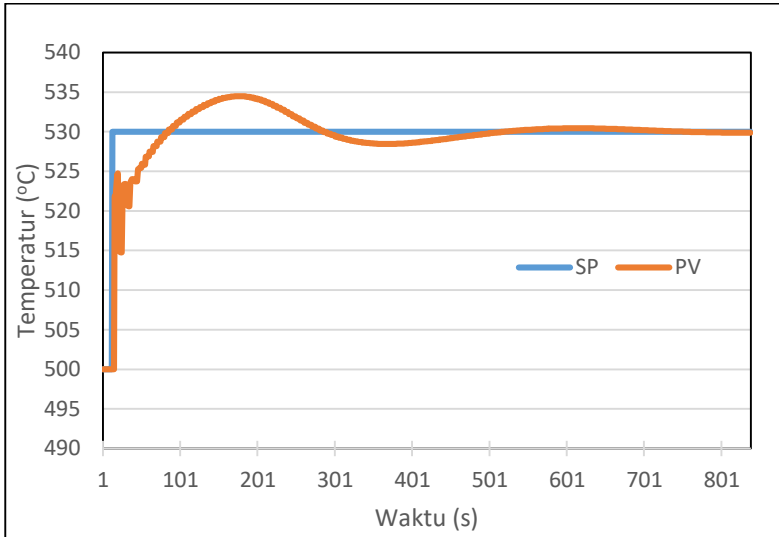
Gambar 4. 12 *Loop* kontrol temperatur pada CCM

Setelah membuat *loop* kontrol dari TIC-101, dilakukan penentuan parameter kontrol menggunakan *autotuner* yang ada pada HYSYS dengan kontrol PI. Pada kontrol TIC-100 ini terdapat *disturbance* yaitu laju aliran massa (kg/s) dari air umpan, sehingga untuk meminimalkan pengaruh *disturbance* ini diperlukan kontrol *feedforward* dengan variabel *disturbance* yaitu laju aliran massa air umpan.

Tabel 4. 8 Parameter kontrol temperatur CCM

P	0,378
I	0,0172
D	0,6

Setelah didapatkan parameter kontrol temperatur TIC-101 maka kemudian dilakukan uji perubahan *set point* dari 500 °C menjadi 530 °C.



Gambar 4. 13 Grafik respon kontrol temperatur pada CCM

Dari grafik pada gambar 4.3 di atas di dapat parameter sebagai berikut

Tabel 4. 9 Karakteristik respon kontrol temperatur pada CCM

Parameter	
<i>Rise Time</i> (sekon)	48
<i>Settling Time</i> (sekon)	628
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	14,94
IAE	1164,7

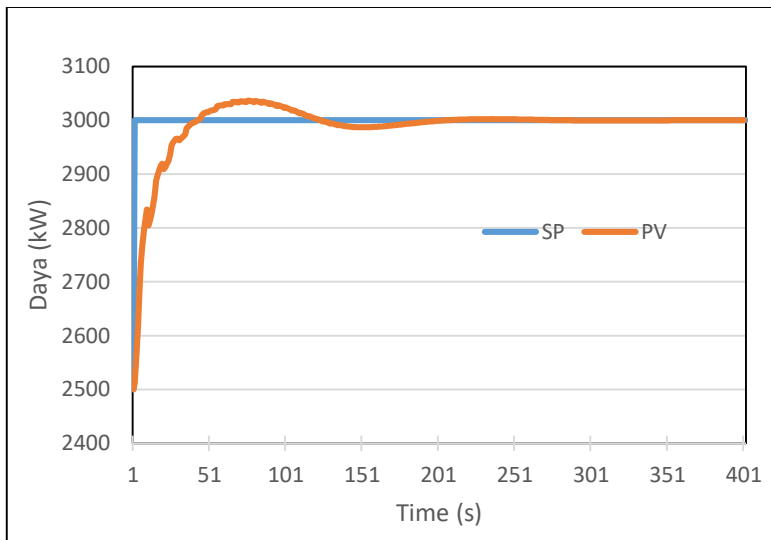
- **Kontrol daya (EIC-100)**

Respon daya pada strategi kontrol CCM dari perubahan setpoint dari 2500 kW menjadi 3000 kW. Pada kontrol daya ini terdapat kontrol *master*-nya yaitu kontrol daya dan *slave*-nya kontrol *flow* FIC-100. Dari *autotuner* yang terdapat pada HYSYS didapatkan parameter kontrol yaitu sebagai berikut:

Tabel 4. 10 Parameter kontrol *cascade* daya EIC-100 CCM

EIC-100 (Master)	
P	1,15
I	0,026
FIC-100 (Slave)	
P	0,131
I	0,0298

Berdasarkan parameter diatas, dilakukan perubahan *set point* daya dari awal 2500 kW menjadi 3000 kW dan didapatkan respon seperti pada grafik di bawah ini

**Gambar 4. 14** Grafik respon kontrol daya CCM

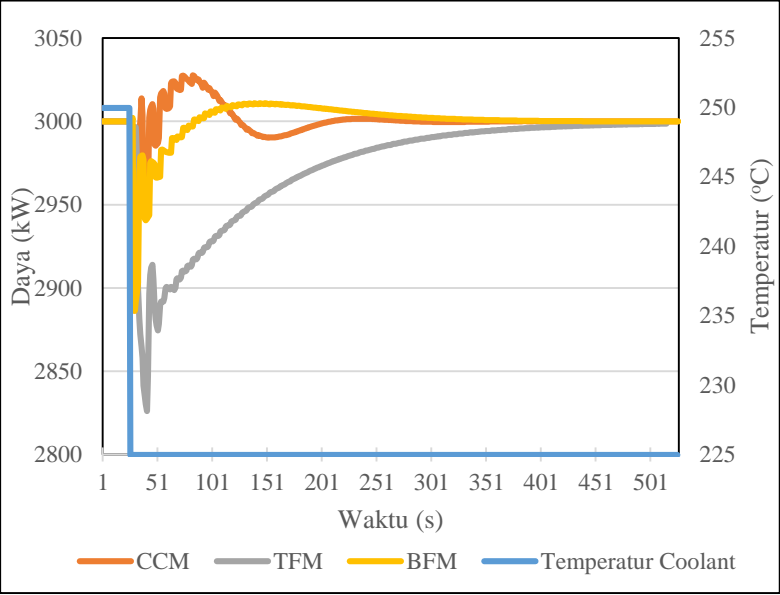
Berdasarkan respon di atas, kemudian dianalisa untuk didapatkan karakteristik respon dari kontrol mode CCM ini

Tabel 4. 11 Karakteristik respon kontrol daya CCM

Parameter	
<i>Rise Time</i> (sekon)	23
<i>Settling Time</i> (sekon)	169
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	7,324
IAE	7904,6

4.1.4 Uji *Disturbance*

Setelah melakukan uji *set point* pada kontrol yang ada pada RDE ini, dilakukan uji *disturbance* untuk melihat apakah mode kontrol yang dipasang ini *robust* atau tidak. *Disturbance* yang terdapat pada *plant* ini adalah temperatur dari *coolant* reaktor yaitu gas *Helium*. Pada kondisi aktual temperatur dari gas *Helium* dapat berubah-ubah karena *loop* dari gas *Helium* yang tertutup. Perubahan suhu air umpan ini dapat mempengaruhi Kalor yang diberikan oleh reaktor serta keluaran daya dari turbin. Suhu normal gas *Helium* masukan reaktor adalah 250 °C. Pada uji *disturbance* ini diberikan penurunan pada suhu *inlet* dari gas *Helium* sebesar 25 °C. Keluaran yang diamati terletak pada respon keluaran daya turbin. Berikut hasil pengujian *disturbance* dan dibandingkan secara langsung responnya terhadap tiga strategi kontrol yang sudah ada.



Gambar 4. 15 Grafik uji *disturbance* terhadap *set point* daya

Dari hasil uji *disturbance* yang telah dilakukan didapatkan bahwa semua strategi kontrol baik itu CCM, TFM, dan BFM dapat mengatasi *disturbance* dan dapat mengembalikan *set point* yang sempat berubah akibat adanya pengaruh *disturbance* penurunan suhu *coolant* sebesar 250 °C. Berdasarkan analisa grafik didapatkan perubahan daya dan IAE dari ketiga struktur kontrol sebagai berikut

Tabel 4. 12 Parameter uji *disturbance*

	BFM	TFM	CCM
Perubahan daya (kW)	113,52	126,18	113,75
IAE	3086,85	5015,45	2696,86

Dari hasil data tabel di atas, didapatkan strategi kontrol CCM memiliki respon yang terbaik berdasarkan perubahan daya yang terjadi dan nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan BFM dan TFM.

4.1.5 Perhitungan Operasional RDE

Tujuan dari RDE ini adalah menghasilkan daya sebesar 3 MW dengan *cost* operasional yang serendah mungkin untuk memaksimalkan profit yang didapat. Berdasarkan penentuan kontrol sebelumnya dapat memaksimalkan efisiensi dari operasional RDE ini.

- **Biaya Bahan Baku (Uranium)**

Berdasarkan data *list* harga yang diterbitkan oleh US *Department of Energy* pada *website*-nya pada daftar harga *Uranium*, didapatkan harga *Uranium* tipe UO_2 yang kandungan U-235 diperkaya hingga 4% sebesar 680 dollar sebanyak 5,4 gram. Pada fungsi objektif diperlukan biaya yang dibutuhkan tiap kW termal yang dihasilkan oleh panas reaktor.

Energi yang dihasilkan untuk setiap satu reaksi fisi sebesar $E_r = 200,7 \text{ MeV/fisi}$. Massa dari satu atom *Uranium* adalah $3,9 \times 10^{-25} \text{ kg}$. Jumlah atom *Uranium* tiap gramnya dapat dihitung dengan

$$\text{Jumlah} \frac{\text{atom}}{\text{gr}} = \frac{0,001 \text{ kg}}{3,9 \times 10^{-25} \text{ kg}} = 2,564 \times 10^{21} \text{ atom/gr}$$

Dalam 5,4 gram atom akan terdapat $1,385 \times 10^{22}$ atom uranium. Dalam setiap reaksi fisi *Uranium 235* akan menghasilkan energi 200,7 MeV yang setara dengan $8,93 \times 10^{-18} \text{ kW}$. Hal ini yang berarti $1,385 \times 10^{22}$ atom *Uranium* dalam 5,4 gram UO_2 akan menghasilkan total daya panas sebesar

$$Q = 1,385 \times 10^{22} \text{ atom} \times 8,93 \times 10^{-18} \text{ kW}$$

$$Q = 123.646,15 \text{ kW}$$

Berdasarkan kurs pada 7 Juni 2018 kurs dollar ke rupiah adalah Rp 13.875,00. Sehingga \$ 680 jika diubah ke rupiah akan menjadi Rp 9.435.000. Sehingga didapatkan biaya bahan baku uranium per kWhnya adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{Biaya Uranium} &= \frac{9.435.000 \text{ Rupiah}}{123.646,15 \text{ kWh}} \\ &= \text{Rp } 76 / \text{kWh} \end{aligned}$$

- **Fungsi Objektif**

Harga tarif listrik PLN pada bulan Maret 2018 adalah 1352 (Rp/kWh).

Pada tiga strategi kontrol ini diasumsikan daya yang dibutuhkan pompa dan *blower* memiliki daya yang sama. Sehingga daya produk yang digunakan pada perhitungan fungsi objektif menggunakan daya netto.

Tabel 4. 13 Perhitungan Daya Bersih RDE

Daya yang Dihasilkan	
P Generator	3000
Daya Operasional	
P Pompa Feed	29,44
P Blower	72,49
Daya Netto	2898,07 kW

Perhitungan fungsi objektif yang telah ditentukan pada *step 1* pada langkah-langkah EPWC sesuai persamaan 3.1 terhadap tiga strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM adalah sebagai berikut: Pada perhitungan ketiga strategi kontrol dilakukan perhitungan berdasarkan *set point* daya 3000 kW.

- **Profit Boiler Following Mode (BFM)**

$$J = p_p.P - (p_u.Q + p_w.W)$$

$$J = 76 \text{ (IDR/kWh)} \times 9799 \text{ (kWh)} + 62075 \text{ IDR/m}^3 \times 13,71 \text{ m}^3/\text{h} - 1352 \text{ IDR/kWh} \cdot 2898,07 \text{ kWh}$$

$$J = 2.319.415 \text{ (IDR/h)}$$

- **Profit Turbine Following Mode (TFM)**

$$J = p_p.P - (p_u.Q + p_w.W)$$

$$J = 76 \text{ (IDR/kWh)} \times 10090 \text{ (kWh)} + 62075 \text{ IDR/m}^3 \times 14,12 \text{ m}^3/\text{h} - 1352 \text{ IDR/kWh} \cdot 2898,07 \text{ kWh}$$

$$J = 2.271.759 \text{ (IDR/h)}$$

- **Profit Coordinated Control Mode (CCM)**

$$J = p_p.P - (p_u.Q + p_w.W)$$

$$J = 76 \text{ (IDR/kW)} \times 9975 \text{ (kWh)} + 62075 \text{ IDR/m}^3 \times 13,27 \text{ m}^3/\text{h} - 1352 \text{ IDR/kWh} \cdot 2898,07 \text{ kW}$$

$$J = 2.333.298 \text{ (IDR/h)}$$

Dari perhitungan di atas strategi kontrol CCM memiliki profit terbesar yaitu Rp 2.333.298,00 / jam.

Perhitungan Efisiensi Energi

Berikut merupakan tabel perbandingan efisiensi energi dari ketiga strategi kontrol.

Tabel 4. 14 Perhitungan efisiensi energi

	BFM	TFM	CCM
Q Reaktor (kW)	9799	10090	9975
Efisiensi	29.6 %	28.7 %	29.1 %

Dari data di atas didapatkan strategi kontrol BFM memiliki efisiensi energi tertinggi yaitu 29,6 % berdasarkan daya netto yang dihasilkan 2898,07 kW.

4.2 Pembahasan

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan EPWC yang dikembangkan oleh Skogestad pada PLTN atau Reaktor Daya Eksperimental (RDE) tipe *High Temperature Gas-Cooled Reactor* yang akan dibangun di Serpong. RDE ini menggunakan panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi dari uranium yang digunakan untuk memanaskan *coolant* reaktor yaitu gas *Helium*, gas *Helium* berenergi tinggi ini kemudian digunakan untuk memanaskan air menjadi uap yang digunakan untuk memutar turbin.

Pada analisa *Top Down* didapatkan fungsi objektif dari *plant* ini yaitu memaksimalkan profit berdasarkan daya yang dihasilkan dengan memperhitungkan energi dari bahan bakar *Uranium* yang dibutuhkan, biaya operasional dari pompa dan *blower* pada *loop* primer, dan biaya *demineralized water*. Pada kondisi operasional *steady state* didapatkan nilai CDOF yaitu 4 dan TPM dari RDE ini yaitu pada *set point* daya yang kemudian didapatkan tiga alternatif

strategi kontrol berdasarkan variabel-variabel yang harus dikontrol dan variabel-variabel yang dapat dimanipulasi, yaitu *Boiler Following Mode* (BFM), *Turbine Following Mode* (TFM), dan *Coordinated Control Mode* (CCM). Tiga alternatif strategi kontrol ini kemudian dibandingkan performanya dan profit yang didapatkan.

Langkah melakukan uji performansi yang pertama adalah melalui uji perubahan *set point* daya dari 2500 kW ke 3000 kW dan perubahan *set point* suhu *steam* dari 500 °C ke 530 °C. Pada strategi kontrol BFM didapatkan respon kontrol temperatur dengan *rise time* 41 sekon, *settling time* 227 sekon, *maximum overshoot* 10,12 persen, dan IAE sebesar 737,8 serta respon kontrol daya dengan *rise time* 64 sekon, *settling time* 125 sekon, *maximum overshoot* 1,674 persen, dan IAE sebesar 10170,8. Pada strategi kontrol TFM didapatkan respon kontrol temperatur dengan *rise time* 111 sekon, *settling time* 221 sekon, *maximum overshoot* 0%, dan IAE sebesar 1217,6 serta respon kontrol daya dengan *rise time* 168 sekon, *settling time* 320 sekon, dan IAE sebesar 29810,5. Pada strategi kontrol CCM didapatkan karakteristik respon pada kontrol temperatur nilai *rise time* 48 sekon, *settling time* 628 sekon, *maximum overshoot* 14,94 persen, dan IAE sebesar 1164,7. Kemudian hasil respon kontrol daya didapatkan *rise time* 23 sekon, *settling time* 169 sekon, *maximum overshoot* 7,324 persen, dan IAE sebesar 7904,6. Kemudian pada uji *disturbance* melalui perubahan suhu inlet *Helium* dari 250 °C menjadi 225°C semua strategi kontrol dapat kembali menuju *set point* daya awal meskipun sempat beresilasi dengan respon terhadap *disturbance* yang terbaik pada strategi CCM dengan nilai IAE sebesar 2696,86. Untuk efisiensi energi dari keseluruhan *plant* dibandingkan berdasarkan kalor termal yang dibutuhkan pada masing-masing strategi kontrol untuk menghasilkan produk daya bersih sebesar 2898,07 kW, didapatkan strategi kontrol BFM memiliki efisiensi terbesar yaitu 29,6 %, kemudian CCM sebesar 29,1 % dan terakhir TFM sebesar 28,7 %.

Perhitungan hasil profit dari fungsi objektif didapatkan strategi kontrol BFM memiliki profit 2.319.415,00 IDR/h, strategi kontrol TFM memiliki profit 2.227.159,00 IDR/h, dan strategi kontrol CCM memiliki profit 2.333.298,00 IDR/h. Pada perbandingan profit ini, strategi kontrol CCM memiliki nilai profit yang paling besar, diikuti BFM dan yang terakhir TFM. Strategi kontrol CCM dapat menghemat penggunaan *demineralized water* dibandingkan strategi kontrol lainnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari hasil tugas akhir mengenai perancangan EPWC pada PLTN HTGR ini adalah sebagai berikut:

1. Penerapan EPWC pada RDE HTGR ini didapatkan fungsi objektif dengan memaksimalkan profit dengan mempertimbangkan biaya operasional, biaya bahan bakar konsumsi uranium, dan produk yaitu daya yang dihasilkan. TPM dari RDE ini terletak pada *set point* daya.
2. Penerapan EPWC pada *plant* PLTN HTGR berhasil menghasilkan tiga struktur kontrol yaitu BFM, TFM, dan CCM. Strategi kontrol yang dapat menghasilkan respon yang paling baik ketika diberi *disturbance* berupa penurunan suhu dari *coolant* reaktor yaitu strategi kontrol CCM. Strategi kontrol yang memberikan profit terbesar pada PLTN tipe HTGR ini adalah dengan menggunakan strategi kontrol CCM yang mampu menghasilkan profit sebesar 2.333.298,00 IDR /h. Sedangkan strategi kontrol yang memiliki efisiensi energi terbesar yaitu BFM sebesar 29,6 %.

5.2 Saran

Melakukan penelitian mengenai *Economic PlantWide Control* dengan mempertimbangkan masalah ekonomi lainnya seperti *capital cost* dan lainnya

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Ahokas, "The Role of Nuclear Power in the Future Energy System," Lappeenranta University of Technology, 2015.
- [2] E. S. Beckjord, *The Future of Nuclear Power*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [3] IAEA, "IAEA-TECDOC-1085: Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power," *Iaea-Tecdoc-1085*, no. May, 1999.
- [4] Timo Martti Heikki Koivumäki, "Nuclear Power *Plants* and Sustainability," Reykjavik University, 2010.
- [5] C. W. Ressel, "Modelling and *Control* of Feed Water Systems in a Pressurized Water Reactor," Chalmers University of Technology, 2010.
- [6] G. F. Hewitt and J. G. Collier, *Introduction to Nuclear Power*. New York: Taylor & Francis, 2000.
- [7] L. Husdal, "An Introduction to Nuclear Power and Resources," Universitas Bergensis, 2009.
- [8] G. J. Suppes and T. Storvick, *Sustainable Nuclear Power*. Burlington: Elsevier Academic Press, 2007.
- [9] K. Krane, *Modern Physics*, 3rd ed. Oregon: John Wiley and Sons, Inc, 2012.
- [10] K. Krane, *Introductory Nuclear Physics*. Oregon: Kim Hup Lee Printing, 1988.
- [11] A. A. F. Mohammed, "Impacts of Interconnecting a Nuclear Power *Plant* On The Performance of an Existing Power System Network . By Electrical Power and Machines Engineering," Cairo University, 2011.
- [12] G. Bereznai, "NUCLEAR POWER *PLANT* SYSTEMS and OPERATION," *6P03*, no. July. Ontario, 2005.
- [13] J. Wood, *Nuclear Power*. United Kingdom: Berne Convention and the Universal Copyright Convention, 2007.
- [14] S. Ueta, J. Aihara, K. Sawa, A. Yasuda, M. Honda, and N. Furihata, "Progress in Nuclear Energy Development of high temperature gas-cooled reactor (HTGR) fuel in

- Japan,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 53, no. 7, pp. 788–793, 2011.
- [15] S. Kakac, H. Liu, and A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers Selection, Rating, and Thermal Design*, 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2012.
 - [16] J. Smuts, “Improving Boiler Stability Through Advanced Regulatory *Control* Boiler *Control* Systems , Advanced Regulatory *Control*,” no. Figure 1, 2010.
 - [17] T. E. Marlin, “Process *Control* Designing Processes and *Control* Systems for Dynamic Performance,” 2nd ed., Ontario: McGraw-Hill, 2015.
 - [18] D. A. M. Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, “Process Dynamics and *Control* Seborg.” John Wiley and Sons, Inc, New York, p. 732, 2004.
 - [19] G. P. Rangaiah and V. Kariwala, Eds., *Plantwide Control Recent Developments and Applications*. Singapore: John Wiley and Sons, Inc, 2012.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Ariel Faishal Lingga Putra ini akrab disapa dengan nama Ariel. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, lahir di kota Jember pada tanggal 5 Januari 1996. Penulis menempuh pendidikan di SDN Jember Lor III lulus tahun 2008, SMPN 2 Jember lulus tahun 2011, dan SMAN 1 Jember tahun 2014. Pendidikan sarjana ditempuh di Departemen Teknik Fisika ITS melalui jalur SNMPTN 2014. Selama aktif sebagai mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi kemahasiswaan Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika (HMTF) ITS pada periode 2015-2016 sebagai staff dan 2016-2017 sebagai Kepala Departemen bidang Internal. Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan pada acara ITS Expo pada tahun 2015, 2016, dan 2017. Kemudian, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol selama periode 2016-2018. Pengalaman *internship program* selama 1 bulan di PT. Indonesian Power di Pesanggaran, Denpasar, Bali. Penulis dapat dihubungi di email arielfaishal05@gmail.com.